

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ – ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ: «ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Αναωνίου Μ. Νικα

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΧΑΛΥΒΑ CK60

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 1999 – 2000

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ – ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ: «ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ»

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΥ Μ. ΝΙΚΑ

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΧΑΛΥΒΑ CK60

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 1999 – 2000

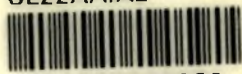
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ



αρ. εισ. 2295/Π.Α.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062980

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	2295/1
Ημερ. Εισ.:	09-10-2000
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜΒ
	2000
	ΝΙΚ



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
I. Εισαγωγή στην Ηλεκτροδιάβρωση (EDM) – Ιστορικό μεθόδου – αρχή λειτουργίας – μηχανισμός EDM	1 – 10
II. Ποιότητα επιφανείας παραγόμενη από EDM – μικροσκληρότητα – παραμένουσες τάσεις	11 – 35
III. Σκοπός της εργασίας - Επιφανειακή τοπογραφία των EDM επιφανειών – πολυπαραμετρική ανάλυση – στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης (απλά και πολυμετάβλητα). Συνθήκες κατεργασίας – στατιστική κατανομή των παραμέτρων επί των επιφανειών – μοντελοποίηση - ισοτροπία	36 – 134
IV. Τριβολογική συμπεριφορά – δοκιμή τριβής και φθοράς Πειράματα: - φθορά σε μεγάλη, μεσαία, μικρή ενέργεια - τριβή σε μεγάλη ενέργεια	135 – 168
V. Γενικά συμπεράσματα	169 – 170
VI. Βιβλιογραφία	171 – 172

# I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (EDM) – ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ – ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ EDM

## I.1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα, έχει σαν συνέπεια, μεταξύ άλλων, και την ανάπτυξη νέων μεθόδων κατεργασίας των μετάλλων που διαφέρουν από τις γνωστές μεθόδους κοπής και διαμορφώσεως, τις λεγόμενες και συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Υπάρχουν τουλάχιστον 26 νέες «μη συμβατές» μέθοδοι κατεργασίας όπως ονομάστηκαν, που διακρίνονται σε τέσσερις κύριες ομάδες: μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές και χημικές.

Οι νέες αυτές μέθοδοι ανεκαλύφθηκαν, ανεπτύχθηκαν και εξελίσσονται όχι μόνο για να ανταποκριθούν στις κλασικές ανάγκες κατεργασίας και διαμόρφωσης των συνήθων μετάλλων και κραμάτων, αλλά και για να προσφέρουν λύσεις σε σύγχρονες ανάγκες της τεχνολογίας όπως: η κατεργασία πολύ σκληρών θερμοαντόχων υλικών αεροπορικών / διαστημικών κατασκευών και πυρηνικών σταθμών (Hastalloy, Nitralloy, Waspalloy, Nimonic κλπ.), η διαμόρφωση συμβατικών τεμαχίων με πολύπλοκη όμως μορφή και απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας, η αποφυγή επηρεασμού της μεταλλουργικής υφής του τεμαχίου, η επίτευξη ικανοποιητικών χαρακτηριστικών κόπωσης, η ταυτόχρονη κατεργασία τεμαχίων κατασκευασμένων από δύο ή περισσότερα υλικά, η απ' ευθείας κατεργασία βαμμένων χαλύβων κ.α. Σε πολλές από τις ως άνω περιπτώσεις οι συμβατικές μέθοδοι ή είναι απλώς αδύνατοι ή επιβάλλουν ανυπόφορο κόστος παραγωγής (πολύ ακριβή εργαλειομηχανή, πολύ μικρή διάρκεια ζωής των εργαλείων κοπής, μεγάλοι νεκροί χρόνοι, αυξημένα εργατικά, κακή ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας κλπ.).

Από όλες αυτές τις νέες «μη συμβατικές» μεθόδους κατεργασίας, μια είναι αυτή που ξεχώρισε ιδιαίτερα καθώς εξ ακολουθεί να υπερέχει σαφώς από τις υπόλοιπες τόσο σε πλήθος εφαρμογών στην βιομηχανία όσο και σε αριθμό εγκατεστημένων ανά τον κόσμο σχετικών εργαλειομηχανών. Αυτή είναι η κατεργασία δι' ηλεκτροδιαβρώσεως γνωστή και ως «κατεργασία EDM» από τα αρχικά του αντίστοιχου όρου στην Αγγλική (**Electrical Discharge Machining**).

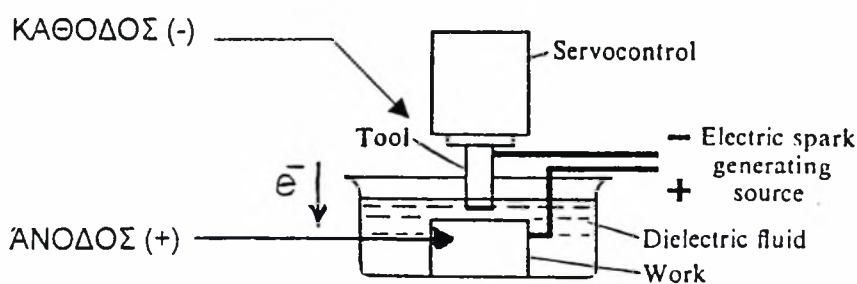
Η EDM μέθοδος πρακτικά συνίσταται στην αφαίρεση υλικών με ελεγχόμενη διάβρωση δια μέσου μιας σειράς από ηλεκτρικούς σπινθήρες, ξεκίνησε δε κατά

πρώτον γύρω στο 1943 στην πρώην Σοβιετική Ένωση, από σχετικές εργασίες δύο ρώσων επιστημόνων του B. R. και N. I. Lazarenko.

Έχει παρατηρηθεί ότι κάθε φορά που πλησιάζουν μεταξύ των τα άκρα δυο αγωγών συνδεδεμένων αντίστοιχα με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής παρατηρείται ηλεκτρική εκκένωση. Δημιουργείται δηλαδή σπινθήρας και από την υψηλή θερμοκρασία και την δράση ηλεκτρικών μοριακών δυνάμεων λειώνει και αποσπάται υλικό και από τους δυο αγωγούς, κυρίως όμως από τον θετικά φορτισμένο. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην φθορά των ηλεκτρικών επαφών ενός διακόπτη ισχύος, η οποία οφείλεται στις ηλεκτρικές εκκενώσεις που παρατηρούνται την στιγμή που απομακρύνονται οι επαφές του και γίνεται διακοπή του ρεύματος (πράγμα που ενωρίς οδήγησε στην κατασκευή κατάλληλων υλικών ηλεκτρικών επαφών που αντέχουν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό χειρισμών με φορτίο). Στην ηλεκτροδιάβρωση γίνεται ακριβώς αφαίρεση υλικού με τη βοήθεια ελεγχόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων.

## 1.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

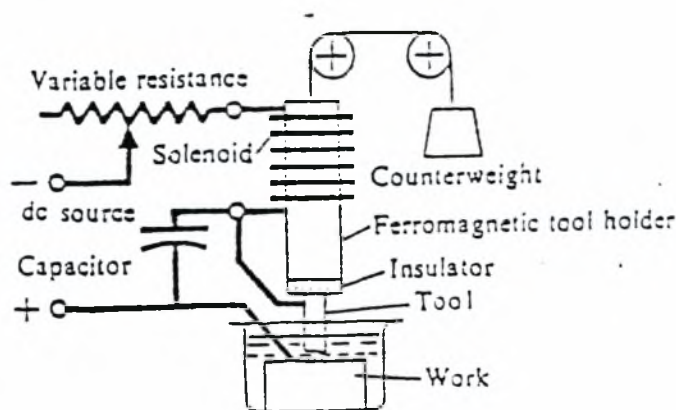
Το βασικό σχήμα της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης (EDM) φαίνεται στο σχ. 1.2.1 κάτωθι: [5]



Σχ. 1. 2.1 Βασική διάταξη EDM

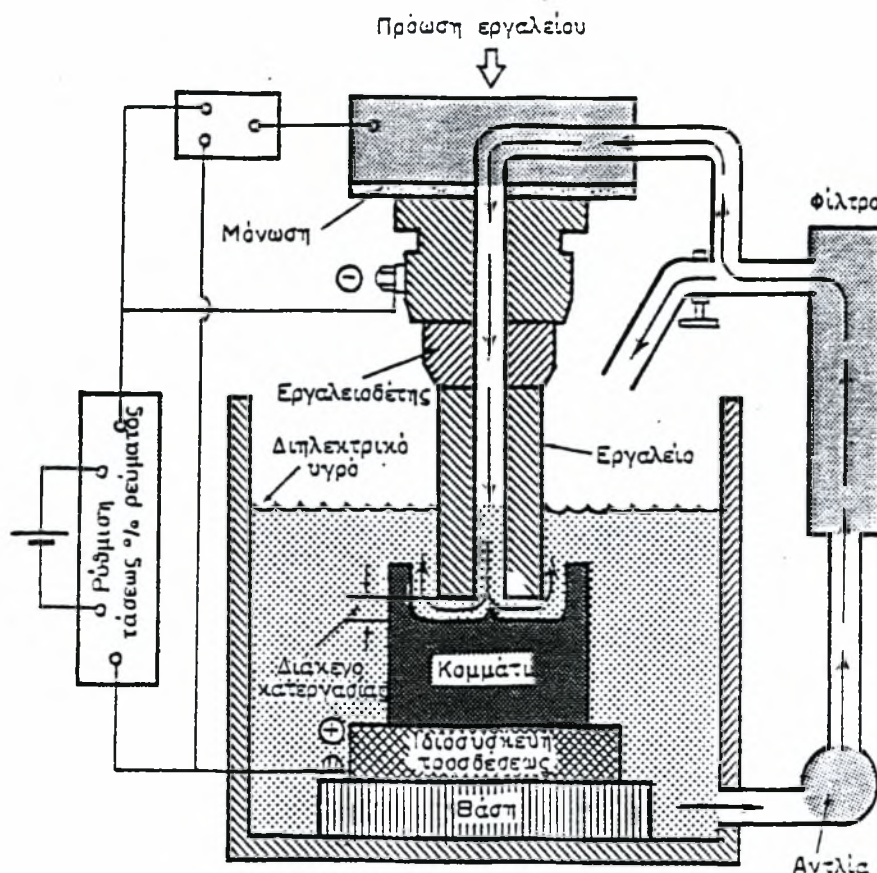
Όταν μια εκκένωση (ή εκφόρτιση) λαμβάνει μέρος μεταξύ δύο σημείων της ανόδου και της καθόδου, η έντονη θερμότητα που αναπτύσσεται στην ζώνη εκκένωσης λειώνει και εξατμίζει τα υλικά. Για βελτίωση της αποτελεσματικότητας, το τεμάχιο εργασίας και το εργαλείο είναι βυθισμένα σε ένα διηλεκτρικό υγρό (υδρογονάνθρακα ή ορυκτά λάδια). Έχει παρατηρηθεί ότι αν αμφότερα τα ηλεκτρόδια είναι φτιαγμένα από το ίδιο υλικό, το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο με το

θετικό πόλο διαβρώνεται γρηγορότερα. Γι' αυτόν τον λόγο, το τεμάχιο εργασίας είναι συνδεδεμένο με την άνοδο(+). Ένα κατάλληλο κενό, γνωστό ως διάκενο σπινθηρισμού, διατηρείται μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου εργασίας. Οι σπινθήρες εκφορτίζουν σε μια υψηλή συχνότητα με την βοήθεια κατάλληλης πηγής. Εφόσον ο σπινθήρας δημιουργείται στο σημείο όπου οι επιφάνειες εργαλείου και τεμαχίου εργασίας είναι οι πλησιέστερες και εφόσον μετά από κάθε σπινθηρισμό (ηλεκτρική εκκένωση) αυτό το σημείο αλλάζει, οι σπινθήρες «ταξιδεύουν» πάνω σε όλη την επιφάνεια. Αυτό καταλήγει σε μια ομοιόμορφη αφαίρεση υλικού πάνω από όλη την επιφάνεια και τελικά η επιφάνεια εργασίας «συμμορφώνεται» με την επιφάνεια του εργαλείου. Έτσι το εργαλείο παράγει το απαιτούμενο αποτύπωμα στο τεμάχιο εργασίας. Για την διατήρηση του προκαθορισμένου διάκενου σπινθηρισμού, συνήθως χρησιμοποιείται ένας σερβομηχανισμός. Το διάκενο αυτό γίνεται αισθητό δια του μέσου δυναμικού κατά μήκος του και αυτό το δυναμικό συγκρίνεται με μια προκαθορισμένη τιμή. Η διαφορά που προκύπτει χρησιμεύει για να ελέγχει τον σερβομηχανισμό. Μερικές φορές είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί βηματικός κινητήρας αντί του σερβομηχανισμού ή για πολύ πρωτόγονες κατασκευές, έλεγχος μέσω σωληνοειδούς. Το κάτωθι σχήμα 1.2.2 δείχνει ένα τέτοιο σύστημα. [5]



**Σχ 1.2.2.** Μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης με έλεγχο μέσω σωληνοειδούς

Μια πιο αναλυτική διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται στο σχ. 1.2.3 που ακολουθεί. Τόσο το κομμάτι όσο και το χρησιμοποιούμενο εργαλείο πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το εργαλείο που είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο του συστήματος όπως αναφέραμε, πρέπει να μπορεί να κινείται και να πλησιάζει συνεχώς και να κρατά σταθερή μια μικρή απόσταση, το διάκενο κατεργασίας ή διάκενο σπινθηρισμού, από την επιφάνεια του κομματιού από την οποία και αφαιρείται υλικό. Για τον λόγο αυτό προσαρμόζεται σε ειδική υποδοχή του μηχανισμού πρόωσης κατά τον άξονα «Z» της εργαλειομηχανής. Το κομμάτι που



Σχ. 1.2.3 Τυπική διάταξη κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

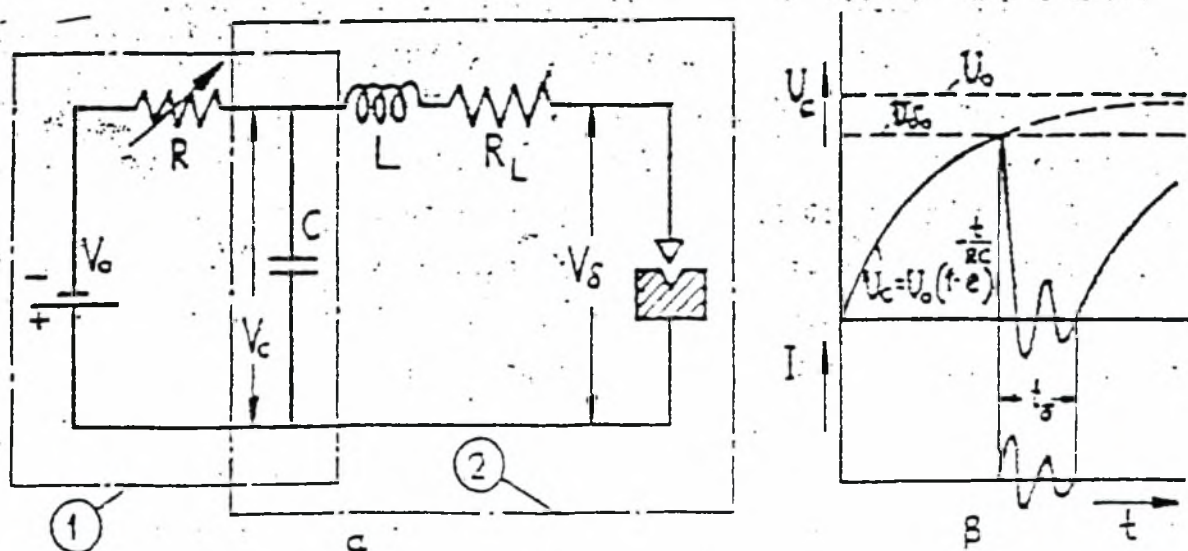
ηλεκτρικά αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο προσδένεται πάνω στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Αμφότερα – εργαλείο και κομμάτι – είναι εμβαπτισμένα μέσα σε δοχείο γεμάτο με μονωτικό διηλεκτρικό υγρό (παραφινέλαιο, έλαιο μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη) που ανακυκλοφορεί συνεχώς. Η διάταξη ανακυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού, εκτός από την αντλία, περιλαμβάνει φίλτρο καθαρισμού και, ενδεχομένως, εναλλάκτη θερμότητας – διηλεκτρικού / νερού – για την απαγωγή της εκλυόμενης από τις φορτίσεις θερμότητας. Κομμάτι και εργαλείο συνδέονται αντίστοιχα σε ειδική ηλεκτρική τροφοδοτική μονάδα (γεννήτρια) που παρέχει την αναγκαία τάση και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος καθώς και την διάρκεια και την συχνότητα των εκφορτίσεων. Το αυτόματο σύστημα ελέγχου του μηχανισμού πρόωσης του εργαλείου εξασφαλίζει συνεχώς κατά την διάρκεια της κατεργασίας ένα σταθερό διάκενο 25 – 50  $\mu\text{m}$  μεταξύ των απέναντι επιφανειών εργαλείου – κομματιού. Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων «εργαλείο – κομμάτι» γίνεται μόνο όταν η εφαρμοζόμενη από την



τροφοδοτική μονάδα τάση είναι ίση με την «τάση διάσπασης» του μεταξύ τους διακένου. Η τάση αυτή εξαρτάται τόσο από το σχήμα και την απόσταση στην οποία βρίσκονται μεταξύ τους τα δυο ηλεκτρόδια, όσο και από τις μονωτικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού υγρού. Είναι της τάξης των 15 – 25 volt. Στην πραγματικότητα ύστερα από κάθε εκφόρτιση έχουμε επιφανειακή τήξη – από την παραγόμενη κατά τη διάσπαση του διακένου θερμική ενέργεια – και αφαίρεση υλικού και στα δυο ηλεκτρόδια. Στις αντίστοιχες θέσεις των εκκενώσεων δημιουργούνται πολύ μικροί αβαθείς κρατήρες. Με κατάλληλο όμως υλικό εργαλείου και σωστή ρύθμιση της γεννήτριας τροφοδότησης για την διάρκεια, την ένταση, την συχνότητα των εκφορτίσεων και την πολικότητα των ηλεκτροδίων, επιτυγχάνεται στην πράξη πολύ σημαντική ασυμμετρία φθοράς π.χ. 99,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο – κομμάτι και μόνο 0,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο. Στο τέλος κάθε εκκένωσης το λιωμένο υλικό σε σφαιροειδή μορφή παρασύρεται από το διηλεκτρικό που κυκλοφορεί, απομακρύνεται από τον κρατήρα και συγκρατείται μέσα στο φίλτρο.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της διάταξης σχ. 1.2.3 δίδεται εις το ακόλουθο σχ. 1.2.4α. Η ηλεκτρική συμπεριφορά του κυκλώματος αυτού χαρακτηρίζεται:

- i) Από την φόρτιση του πυκνωτή C μέσω της ωμικής αντίστασης R, θεωρούμενης ως αμελητέας πρακτικώς της επίδρασης του κυκλώματος εκφορτίσης ( $U_c < U_{δ0}$ , ένθα  $U_{δ0}$  είναι η τάση διάσπασης του διάκενου, εξαρτώμενη από το μέγεθος του διάκενου και από τα χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού μέσου).



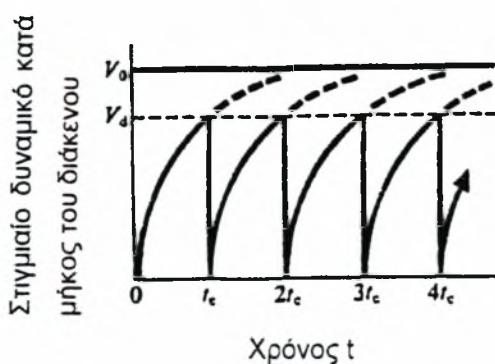
Σχ. 1.2.4α :Το ισοδύναμο κύκλωμα 1. Κύκλωμα φόρτισης, 2. Κύκλωμα εκφορτίσεως

1.2.4.β: Μεταβολές  $U_c$ ,  $I_\delta - t$  ( $t_\delta$ : διάρκεια εκκενώσεως)

- ii) Από την εκφόρτιση του ηλεκτρικού φορτίου του πυκνωτού C ( $U_c = U_{δo}$ )
- iii) Από τα φυσικά χαρακτηριστικά της προκαλούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης (σπινθήρας).

Η μεταβολή της τάσεως  $U_c$  καθώς και του ρεύματος διακένου  $I_{δ}$ , συναρτήσει του χρόνου  $t$ , δίδονται στο σχ. 1.2.4β. [7].

Βέβαια η παραδοχή να θεωρείται αμελητέα η επίδραση του κυκλώματος εκφόρτισης οδηγεί σε μια πιο απλή μορφή της μεταβολής του δυναμικού του διάκενου  $U_c$  ως προς τον χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.4.γ κάτωθι [5]:



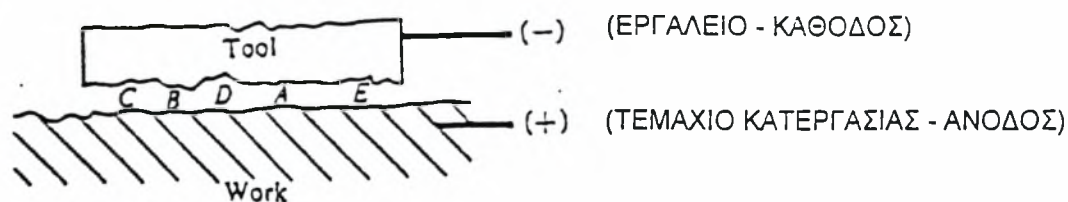
Σχ. 1.2.4.γ: Μεταβολή του δυναμικού του διάκενου  $v_c$  σε σχέση με τον χρόνο

Πράγματι η παραδοχή μπορεί να γίνει διότι ο χρόνος εκφόρτισης  $t_{\delta}$  (σχ. 1.2.4.β.) είναι πολύ μικρότερος (μικρότερος του 10%) του χρόνου φόρτισης  $t_c$  γι' αυτό και η συχνότητα εκφορτίσεων  $\nu$ , προσεγγιστικά μπορεί να ληφθεί ίση με  $\frac{1}{t_c}$  (δες και εξ. II.10 σελ. 17)

Ο εκ της διασπάσεως του διακένου προκαλούμενος ιονισμός του διηλεκτρικού υγρού αναιρείται τάχιστα λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας του, και, κατ' αυτόν τον τρόπον, αποκαθίσταται πάλι το ανοικτό κύκλωμα εκφόρτισης έτοιμο για την επόμενη διάσπαση.

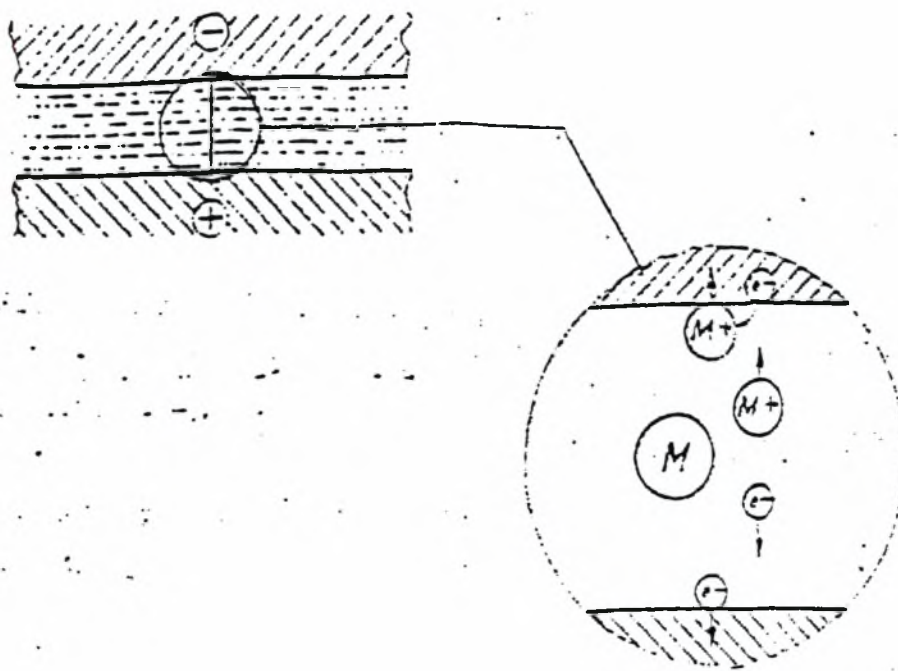
### 1.3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ EDM

Το σχήμα 1.3.1 δείχνει σε λεπτομέρεια τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Καίτοι οι επιφάνειες αυτές φαίνονται λείες, τραχύτητα και ανωμαλίες είναι πάντα παρούσες όπως φαίνεται (με υπερβολικό τρόπο βέβαια).



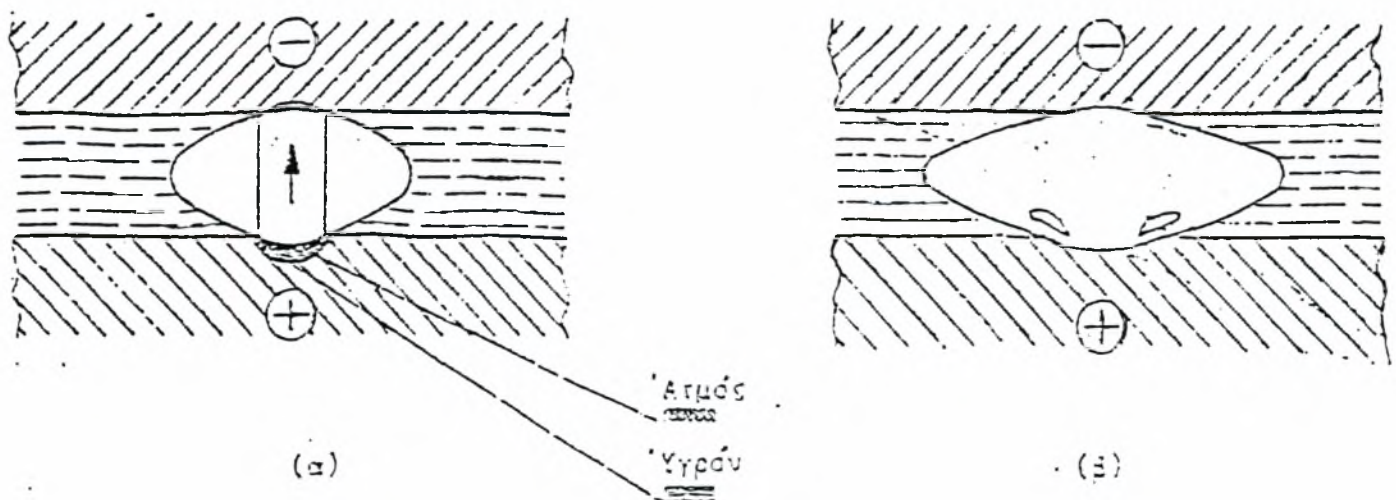
**Σχ. Ι.3.1** Λεπτομέρεια χαρακτηριστικών επιφάνειας ηλεκτροδίων

Σαν αποτέλεσμα, το τοπικό διάκενο μεταβάλλεται και σε κάποια δεδομένη στιγμή ας πούμε ότι είναι ελάχιστο σε ένα σημείο (έστω το Α). Όταν μια κατάλληλη διαφορά δυναμικού αναπτυχθεί μεταξύ εργαλείου και κομματιού κατεργασίας (της καθόδου και της ανόδου, αντίστοιχα), τότε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο επαρκούς έντασης δημιουργείται, το οποίο προκαλεί ψυχρή εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο στο σημείο Α. Αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόδια επιταχύνονται προς την άνοδο. Αφού έχουν κερδίσει μια αρκετή ταχύτητα, τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα μόρια του διηλεκτρικού υγρού, διασπώντας τα σε ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται έτσι επιταχύνονται και αυτά και αποσπών επιπλέον ηλεκτρόνια από τα μόρια του διηλεκτρικού. Στο τέλος μια λεπτή στήλη από ιονισμένα μόρια του διηλεκτρικού δημιουργείται στο Α ενώνοντας τα δυο ηλεκτρόδια (και δημιουργώντας μια χιονοστιβάδα από ηλεκτρόνια, καθώς και η αγωγιμότητα της ιονισμένης στήλης είναι πολύ μεγάλη, η οποία φαίνεται συνήθως σαν σπινθήρας). Αυτή η εντόνως ιονισμένη οδός επιτρέπει την δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης. Εις την πραγματικότητα κατά τη διάρκεια των πρώτων εκατοστών ή και δεκάτων  $\mu\text{sec}$  της εκκένωσης, ο ισχυρός ιονισμός οδηγεί εις την δημιουργία ενός αγωγού από PLASMA (ιονισμένου σε υψηλή θερμοκρασία αέριου,  $8.000 - 12.000^\circ\text{K}$ ). Εις την περίπτωση μας, όπως είπαμε, το plasma αποτελείται από θετικώς φορτισμένα ιόντα μετάλλου  $M^+$  και αρνητικώς φορτισμένα ηλεκτρόνια  $e^-$ , τα οποία προκύπτουν κατά την εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων, από τα μεταλλικά άτομα  $M$  τα οποία συγκρούονται μεταξύ των λόγω της επικρατούσας υψηλής θερμοκρασίας, βλέπε και σχ. Ι.3.2 κάτωθι:



Σχ. 1.3.2 Αρχή ηλεκτρικής εκκένωσης διηλεκτρικού υγρού

Από τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων και των ιόντων του διηλεκτρικού μεταξύ των αλλή και με τα μεταλλικά άτομα  $M$  μέσα στο διηλεκτρικό, αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου μετατρέπεται σε θερμική. Έτσι στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων στα δυο άκρα του κλάδου της εκκένωσης, το μέταλλο εξατμίζεται ακαριαίως και σχηματίζει ένα νέφος ατμού υψηλής πυκνότητας, το οποίο εισορμά εντός του κλάδου της εκκένωσης και εξαπλοείται ακτινικώς εντός της μάζας του διηλεκτρικού, βλέπε σχ. 1.3.3.α



Σχ. 1.3.3 Μηχανισμός αφαίρεσης υλικού δια της ηλεκτροδιαβρώσεως



Η πίεση εντός του νέφους του ατμού είναι της τάξης αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών. Η αφαίρεση υλικού και στα δυο ηλεκτρόδια οφείλεται στην δράση των ουδέτερων μεταλλικών ατόμων  $M$  του plasma, τα οποία κατά την πρόσκρουσή τους στα ηλεκτρόδια τούς μεταδίδουν την θερμική τους ενέργεια. Η αφαίρεση υλικού και εις τα δυο ηλεκτρόδια οφείλεται στην δράση των ουδέτερων μεταλλικών ατόμων  $M$  του plasma, τα οποία κατά την πρόσκρουσή τους εις τα ηλεκτρόδια τους μεταδίδουν την θερμική τους ενέργεια. Εκτός τούτου και τα ηλεκτρόνια αποδίδουν την κινητική τους ενέργεια εις τον κρυσταλλικό ιστό της ανόδου και κατ' αυτόν τον τρόπο συμβάλλουν επίσης εις την δια τήξεως δημιουργία του κρατήρος. Εις την κάθοδο παρατηρείται επίσης το αυτό φαινόμενο κατά την ουδετεροποίηση των θετικών μεταλλικών ιόντων  $M^+$ .

Γενικώς ο λόγος (ρυθμός) αφαίρεσης υλικού (material removal rate, mrr εν συντομία) δεν είναι ίδιος και για τα δυο ηλεκτρόδια. Έτσι το mrr στην κάθοδο είναι συγκριτικά μικρότερο από αυτό στην άνοδο λόγω των ακόλουθων αιτιών:

- (i) Η ορμή με την οποία το ρεύμα των ηλεκτρονίων κτυπάει την άνοδο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν με την οποία το ρεύμα των θετικών ιόντων προσκρούει στην κάθοδο, καίτοι η μάζα ενός μεμονωμένου ηλεκτρονίου είναι μικρότερη από αυτή των θετικών ιόντων.
- (ii) Μια δύναμη συμπίεσης αναπτύσσεται στην επιφάνεια της καθόδου.
- (iii) Η πυρόλυση του διηλεκτρικού υγρού (συνήθως υδρογονάνθρακας), δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα άνθρακα στην κάθοδο.

Κατά συνέπεια, συνήθως το εργαλείο συνδέεται στον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής συνεχούς ρεύματος.

Από όσα αναφέραμε ανωτέρω, καταφαίνεται ότι με την τήξη και εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων, σχηματίζονται μικροί κρατήρες στο σημείο Α και στα δυο ηλεκτρόδια. Μόλις όμως συμβεί αυτό, το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων στο σημείο Α μεγαλώνει, το Α παύει να είναι το πλησιέστερο σημείο μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων και αυτό είναι κάπου άλλου, ας πούμε το Β, σχ. 1.3.1. Έτσι όταν επαναλαμβάνεται ο κύκλος, ο επόμενος σπινθήρας εκδηλώνεται στο Β. Με αυτόν τον τρόπο οι σπινθήρες (οι εκφορτίσεις) περιφέρονται πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και τελικά η διεργασία καταλήγει σε ένα ομοιόμορφο κενό. Έτσι, ανάλογα με το σχήμα του αρνητικού ηλεκτροδίου (εργαλείου), μια αποτύπωσή του δημιουργείται στο άλλο ηλεκτρόδιο (το κομμάτι). Βέβαια αν το εργαλείο παρέμενε στάσιμο σε σχέση με το κομμάτι κατεργασίας, το διάκενο θα αυξανόταν καθώς θα προχωρούσε η κατεργασία, δημιουργώντας την ανάγκη για αυξανόμενο δυναμικό



ώστε να επιτυγχάνεται η έναυση του σπινθήρος. Προς αποφυγήν αυτού του προβλήματος, το εργαλείο προωθείται με την βοήθεια ενός σερβομηχανισμού, ο οποίος «αισθάνεται» το μέγεθος του μέσου διάκενου και το κρατάει σταθερό.

## II. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΑΠΟ EDM – ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

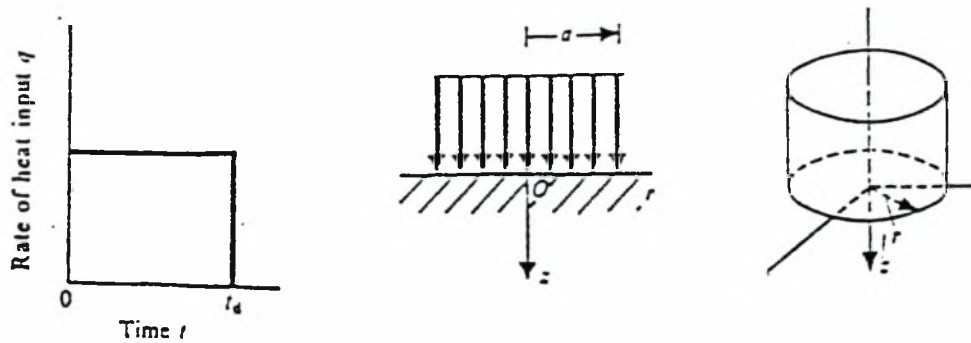
### II.1. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Πριν προχωρήσουμε στην ποιότητα επιφάνειας που παράγεται από την EDM θα επιχειρήσουμε μια σύντομη θεωρητική / μαθηματική προσέγγιση του φαινομένου. Μια τέτοια προσέγγιση της κατεργασίας θα εξηγήσει πολλά από τα χαρακτηριστικά της παραγόμενης ποιότητας επιφάνειας.

Προς τούτο θα προσπαθήσουμε να καταλάβουμε την σημασία του ενός απλού σπινθηρισμού (ή εκφόρτισης ή παλμού όπως θα αναφέρεται στην παρούσα εργασία). Έτσι το ποσό του αφαιρούμενου υλικού κατά την διάρκεια ενός σπινθήρα (μιας εκκένωσης) καθορίζεται από την διάμετρο του δημιουργούμενου κρατήρα και το βάθος στο οποίο φθάνει η θερμοκρασία τήξης. Κάνουμε τις ακόλουθες παραδοχές:

- (i) Ο σπινθήρας είναι μια ομοιόμορφη κυκλική πηγή θερμότητας στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και η διάμετρος ( $=2a$ ) αυτής της κυκλικής πηγής παραμένει σταθερή.
- (ii) Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου θεωρείται μια ημι – άπειρη περιοχή.
- (iii) Εκτός από το τμήμα της πηγής θερμότητας, η επιφάνεια του ηλεκτροδίου είναι μονωμένη
- (iv) Ο ρυθμός εισροής θερμότητας παραμένει σταθερός καθ' όλην την διάρκεια του σπινθήρα (της εκκένωσης)
- (v) Οι ιδιότητες του υλικού του ηλεκτροδίου δεν αλλάζουν με την θερμοκρασία
- (vi) Η εξάτμιση του υλικού του ηλεκτροδίου είναι αμελητέα.

Οι εικόνες II.1.1 κάτωθι δίνουν τις λεπτομέρειες της ιδανικής πηγής θερμότητας που περιγράψαμε ανωτέρω



(α) Σταθερός ρυθμός  
εισροής θερμότητας

(β) Ομοιόμορφη ροή  
θερμότητας

(γ) Κυκλική πηγή  
θερμότητας

**Σχ. II.1.1** Περιγραφή της ιδανικής πηγής θερμότητας κατά τη διάρκεια της EDM

Ορίζουμε:  $H$  = η ποσότητα της θερμότητας που εισάγεται (cal)

$\theta$  = η θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  = ο χρόνος (sec)

$k$  = η θερμική αγωγιμότητα ( $\text{cal/cm sec}^{\circ}\text{C}$ )

$a$  = η θερμική διάχυση ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

$t_d$  = η διάρκεια της εκφόρτισης (του σπινθήρα) (sec)

$\theta_m$  = η θερμοκρασία τήξεως ( $^{\circ}\text{C}$ )

Αρχικές συνοριακές συνθήκες

$$t \leq 0 \rightarrow \theta(r, z, t) = 0$$

$$t > 0, r > a \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0$$

$$0 < r \leq a \rightarrow -k \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{H}{\pi a^2 t_d}$$

Λόγω κυκλικής συμμετρίας, η θερμοκρασία σε κάθε σημείο εξαρτάται από τα  $r$  και  $z$ . Η εξίσωση για την μετάδοση θερμότητας είναι:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (\text{εξ. II.1})$$

Αν είναι  $Z$  το μέγιστο βάθος στο οποίο φθάνει η θερμοκρασία τήξεως, αυτό είναι στο κέντρο του κύκλου (σχ. II.1.1c). Επίσης θεωρούμε ότι η θερμοκρασία φθάνει στην μέγιστη τιμή της την στιγμή  $t = t_d$  καθώς η εισροή θερμότητας σταματάει εκείνη ακριβώς την στιγμή.

Η διάμετρος του κρατήρα (που έχει υποτεθεί ίση με  $2a$ ), δηλαδή η διάμετρος του σπινθήρα, κάτω από τις ιδανικές συνθήκες ομοιόμορφης έντασης είναι:[5]

$$2a = KW^{n_1} t_d^{n_2} \text{ (cm)} \quad \text{(εξ. II.2)}$$

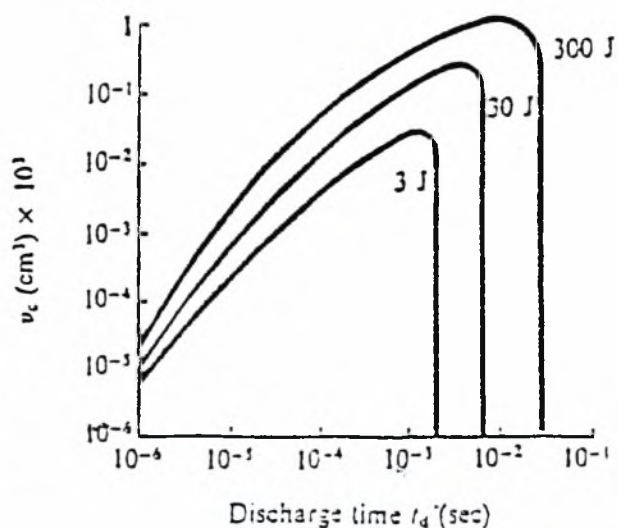
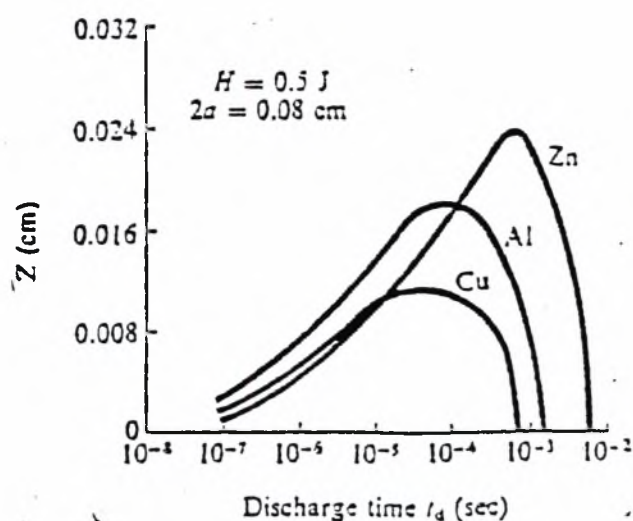
$W$  = η ολική ενέργεια του παλμού (Joules)

$n_1, n_2, K$  = σταθερές που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες των ηλεκτροδίων και του διηλεκτρικού. Το βάθος  $Z$  της θερμοκρασίας τήξεως συνδέεται με τον όγκο του κρατήρα ως εξής:

$$v_c = \frac{\pi}{6} h_c (3a^2 + h_c^2) \text{ (cm}^3\text{)} \quad \text{(εξ. II.3) όπου}$$

$v_c$  = ο όγκος του κρατήρα (cm<sup>3</sup>)

$h_c (\approx Z)$  = το βάθος του κρατήρα (cm)



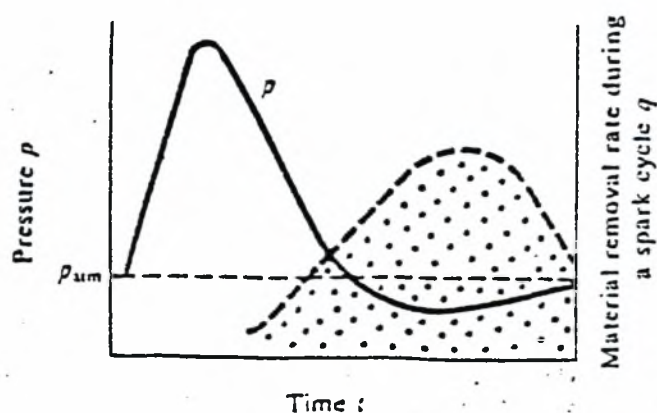
(α) Μεταβολή του  $Z$

(β) Μεταβολή του  $v_c$

**Σχ II.1.2** Μεταβολή του βάθους  $Z$  θερμοκρασίας τήξεως και του όγκου του κρατήρα  $v_c$  σε σχέση με τον χρόνο εκφόρτισης  $t_d$

Είναι προφανές ότι το  $Z$  δίνει μια ένδειξη του υλικού που αφαιρείται από κάθε σπινθηρισμό (εκκένωση). Το σχ. II.1.2α δίνει τις θεωρητικές τιμές του  $Z$  για μια δεδομένη ενέργεια σπινθήρα και μια σταθερή διάμετρο σπινθήρα για Cu, Al και Zn σαν υλικά ηλεκτροδίου. Το σχ. II.1.2.b αναπαριστά την πραγματική φύση της μεταβολής του όγκου του κρατήρα  $v_c$  σε συνάρτηση με τον χρόνο  $t_d$  για διαφορετικές ενέργειες σπινθήρα. Και στα δυο διαγράμματα οι ροπές είναι σχεδόν παρόμοιες. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που καθίσταται εμφανές από αυτά τα αποτελέσματα είναι ότι η αφαίρεση υλικού είναι πολύ χαμηλή για μικρό χρόνο εκφόρτισης και μεγαλώνει με το  $t_d$ . Κατόπιν, προσεγγίζοντας μια μέγιστη τιμή, πέφτει απότομα στο μηδέν.[5]

Το σχήμα II.1.3 που ακολουθεί δίνει την σχέση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού ( $mrr$ ) κατά την διάρκεια μιας απλής εκφόρτισης σε σχέση με τον χρόνο  $t$ . Στο ίδιο διάγραμμα δίδεται και η μεταβολή της τιμής της πίεσης  $p$  που αναπτύσσεται στο διάκενο των δυο ηλεκτροδίων. Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, η πίεση που αναπτύσσεται στην αρχή της εκφόρτισης μέσα στο νέφος του ατμού είναι της τάξεως αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών. Στο σχήμα φαίνεται καθαρά ότι το  $mrr$  είναι μέγιστο όταν η πίεση είναι κάτω από την ατμοσφαιρική και αυτό δείχνει την σπουδαιότητα της σπηλαίωσης στην τιμή  $mrr$ . [5]



Σχ. II.1.3 Ρόλος της πίεσης / σπηλαίωσης στην τιμή  $mrr$

Όσον αφορά πάντα την ποιότητα επιφανείας, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος (διάμετρο  $2a$  και βάθος  $h_c$ ) του κρατήρα σε σχέση με την ενέργεια εκφόρτισης  $W$  (υποθέτοντας ότι όλες οι άλλες συνθήκες παραμένουν αμετάβλητες). Έτσι έχουμε:



$$h_c = K_1 W^{1/3} \quad (\text{cm}) \quad (\text{εξ. II.4})$$

$$2\alpha = K_2 W^{1/3} \quad (\text{cm}) \quad (\text{εξ. II.5})$$

όπου  $K_1$ ,  $K_2$  σταθερές (για παράδειγμα, για ηλεκτρόδια Cu και κηροζίνη σαν διηλεκτρικό μέσο, έχουμε  $K_1 \approx 0,4$  και  $K_2 \approx 0,045$ ). Γενικώς οι σταθερές  $K_1$ ,  $K_2$  αλλά και ο εκθέτης των σχέσεων (εδώ είναι  $1/3$ ) εξαρτώνται από την χημική σύσταση του χάλυβα ή, κατ' άλλους ερευνητές από τον συνδυασμό υλικών εργαλείου – τεμαχίου.

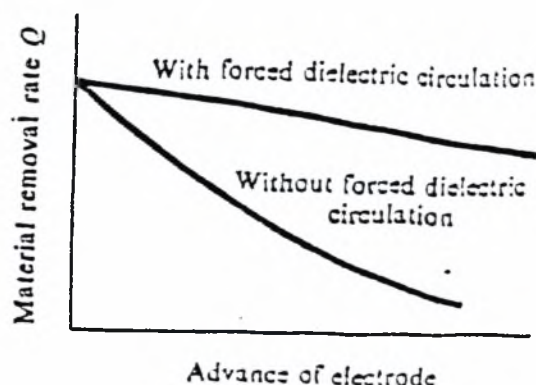
Μια άλλη προσεγγιστική σχέση που συνδέει τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού  $mrr$  με το σημείο τήξεως  $\theta_m$  του υλικού του τεμαχίου κατεργασίας (της ανόδου δηλαδή) είναι η:

$$mrr \approx 4 \times 10^4 \theta_m^{-1.23} \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (\text{εξ. II.6}) \quad \text{όπου}$$

$mrr$  = ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )

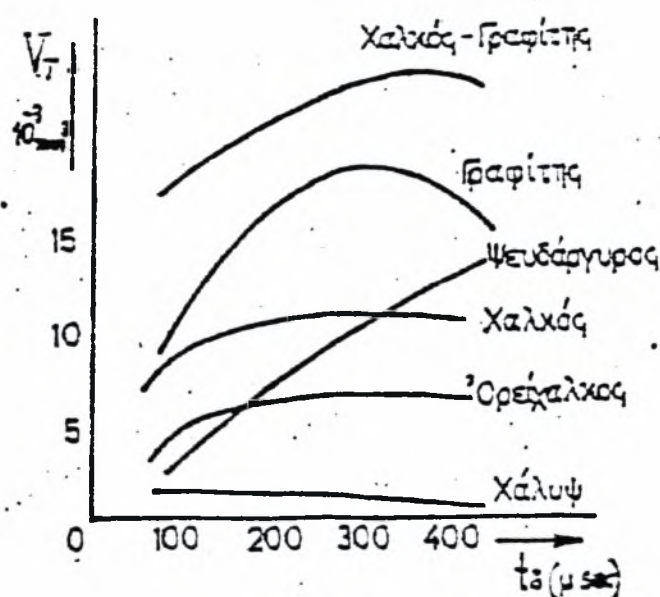
$\theta_m$  = η θερμοκρασία τήξεως ( $^{\circ}\text{C}$ ). [5]

Επίσης ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού ( $mrr$ ) εξαρτάται ισχυρά από την κυκλοφορία του διηλεκτρικού υγρού. Χωρίς εξαναγκασμένη κυκλοφορία, τα σωματίδια από την φθορά κατ' επανάληψιν λειώνουν και ξαναενώνονται με το ηλεκτρόδιο. Το σχήμα II.1.4 που ακολουθεί δίνει την σχέση της φύσης των χαρακτηριστικών της  $mrr$  (ή  $Q$ ) με και χωρίς εξαναγκασμένη κυκλοφορία του διηλεκτρικού [5].

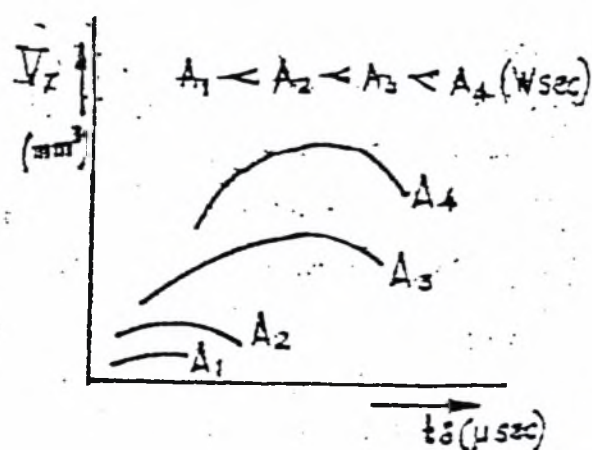


Σχ. II.1.4 Επίδραση της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας διηλεκτρικού στον  $mrr$

Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού εξαρτάται σαφέστατα και από το ίδιο το υλικό του εργαλείου. Το κατωτέρω διάγραμμα σχ. II.1.5.α δίνει την ποσότητα αφαιρούμενου υλικού ανά εκκένωση ( $V_T$ ) σε σχέση με τον χρόνο εκφορτίσεως  $t_d$  για διάφορα υλικά εργαλείων [7].



Σχ. II.1.5.α. Αφαίρεση υλικού ανά εκκένωση  $V_T$  – διάρκεια εκφορτίσεως  $t_d$ , για διάφορα υλικά εργαλείων.



Σχ. II.1.5.b Αφαιρούμενος όγκος υλικού ανά εκκένωση  $V_T$  – χρόνος εκφορτίσεως  $t_d$ , για διάφορες τιμές ενέργειας εκφορτίσεως  $A$ . [7]

Να δώσουμε εδώ και το διάγραμμα που συνδέει τον αφαιρούμενο όγκο υλικού ανά εκκένωση  $V_T$  με τον χρόνο εκφορτίσεως  $t_d$  για τις διάφορες τιμές της ενέργειας εκφορτίσεως  $A$  (σχ. II.1.5.b). Δώσαμε ήδη στις εξισώσεις 1.4 και 1.5 κεφ. I πριν, τις εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν την διάμετρο και το βάθος του κρατήρα που δημιουργείται από μια εκφόρτιση με την ενέργεια της εκφόρτισης  $W$ . Να

Θυμίσουμε ότι από τα πλέον σημαντικά μεγέθη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης είναι και η ενέργεια της  $A$  που εκφράζεται ως:

$$A = \int_0^{t_0} U(t) I(t) dt \quad (\text{εξ. II.7}) \quad \text{όπου}$$

$U(t)$  η εφαρμοζόμενη τάση,  $I(t)$  η ένταση του ρεύματος εκκενώσεως και  $t_0$  η διάρκειά της.

Συνεχίζουμε με την ποιότητα επιφανείας και με το πώς αυτή επηρεάζεται από τα ηλεκτρικά στοιχεία του κυκλώματος ήτοι την αντίσταση  $R$ , την χωρητικότητα  $L$  και το δυναμικό  $V_0$  της πηγής DC.

Έχουμε πει ήδη ότι το δυναμικό  $V$  κατά μήκος του διακένου (το οποίο είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό κατά μήκος του πυκνωτή), συνδέεται με τον χρόνο με την σχέση

$$V = V_0 (1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{εξ. II.8})$$

όπου  $t$  δείχνει τον χρόνο, με εκκίνηση την στιγμή που εφαρμόζεται η  $V_0$ . Η εξίσωση αυτή δίνεται γραφικά στις σελ. 5 και 6, σχ. I.2.4.β. και I.2.4.γ.

Αν δεχτούμε ότι το υλικό που αφαιρείται ανά εκφόρτιση  $Q$ , είναι ανάλογο προς την ενέργεια που απελευθερώνεται ανά εκφόρτιση, τότε

$$Q \approx K(1/2 V_{00}^2 C) \nu \quad (\text{εξ. II.9}) \quad \text{όπου}$$

$E = \frac{1}{2} V_{00}^2 C$  = η ενέργεια που απελευθερώνεται ανά εκφόρτιση.

$K$  = σταθερά αναλογίας που δείχνει το τμήμα της ισχύος που χρησιμοποιείται στην αφαίρεση υλικού

$C$  = η χωρητικότητα του πυκνωτή

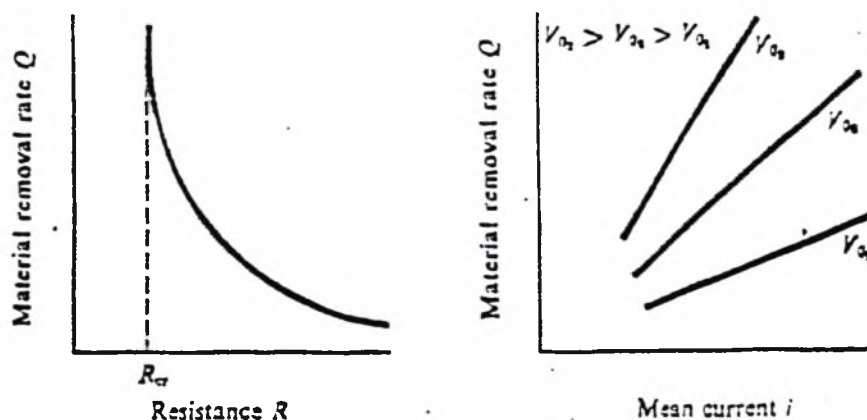
$\nu$  = η συχνότητα των εκφορτίσεων

$V_{00}$  = η τάση εκφόρτισης, δηλαδή η τιμή στην οποία όταν φθάσει η τάση  $V$  κατά μήκος του διάκενου, εκδηλώνεται ο σπινθήρας ο οποίος εκφορτίζει τελείως τον πυκνωτή.

$$\text{Η συχνότητα } \nu \text{ είναι ανάλογη του } \frac{1}{RC} : \nu \approx \frac{1}{RC} \quad (\text{εξ. II.10})$$

$$\text{άρα από την εξ. II.9 προκύπτει ότι η ποσότητα } Q \text{ είναι } Q \approx \frac{1}{R} \quad (\text{εξ. II.11})$$

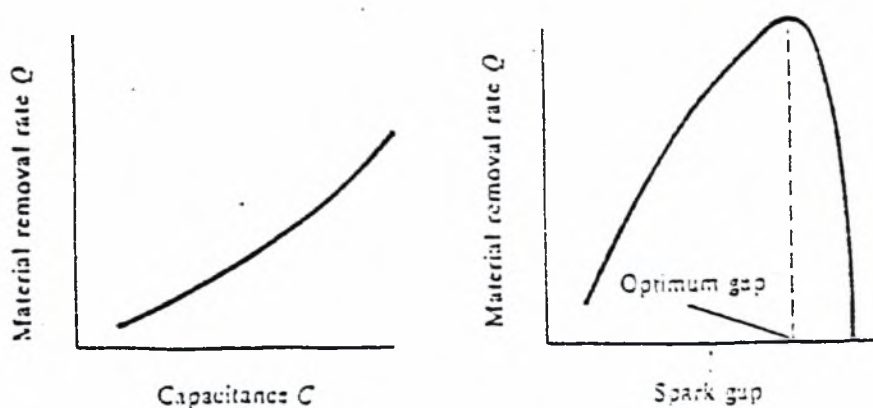
Προκύπτουν έτσι τα ακόλουθα διαγράμματα:



(α) Μεταβολή με την αντίσταση  $R$

(β) Μεταβολή με το μέσο ρεύμα  $i$

Σχ. II.1.5 Χαρακτηριστικά ρυθμού αφαίρεσης υλικού ( $mrr$  ή  $Q$ ) στην EDM χρησιμοποιώντας κύκλωμα RC

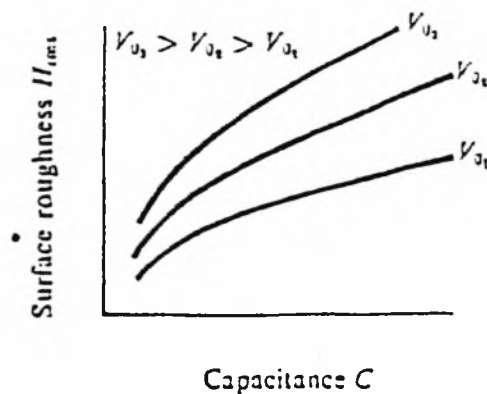


(α) Μεταβολή με την χωρητικότητα  $C$

(β) Μεταβολή με το διάκενο σπινθήρα

Σχ. II.1.6 Χαρακτηριστικά ρυθμού αφαίρεσης υλικού στην EDM χρησιμοποιώντας κύκλωμα RC

Επειδή τώρα, η αφαίρεση υλικού στην EDM επιτυγχάνεται δια μέσου του σχηματισμού κρατήρων λόγω των σπινθήρων, είναι εμφανές ότι μεγάλα μεγέθη κρατήρων (ειδικά σε βάθος) καταλήγουν σε «άγρια» (τραχεία) επιφάνεια. Έτσι λοιπόν το μέγεθος του κρατήρα, το οποίο κυρίως εξαρτάται από την ενέργεια ανά εκφόρτιση (δες και εξισώσεις II.4 και II.5 σελ. 15), ρυθμίζει την ποιότητα της επιφάνειας. Το σχέδιο II.1.7 δείχνει πως η  $R_q$  ή  $H_{rms}$  (= root mean square value of the surface unevenness, μέση τετραγωνική τιμή της τραχύτητας) εξαρτάται από τα  $C$  και  $V_0$ .



**Σχ. II.1.7** Εξάρτηση της τραχύτητας επιφάνειας από την χωρητικότητα  $C$  και το δυναμικό  $V_0$  της πηγής

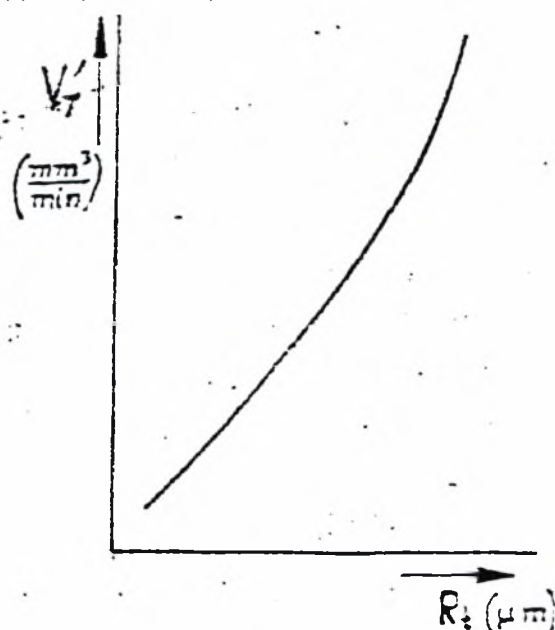
Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να καθορισθεί μια κατάλληλη σχέση μεταξύ του ρυθμού απομάκρυνσης υλικού ( $\text{mm}^3$ ) και της ποιότητας του τελειώματος της επιφάνειας. Όμως μια πολύ αξιόπιστη σχέση γενικής εφαρμογής πρέπει ακόμα να βρεθεί. Παρόλα αυτά, το  $\text{mm}^3$  και η τραχύτητα επιφάνειας, όταν κατεργαζόμαστε χάλυβα υπό φυσιολογικές συνθήκες, μπορούν να συνδεθούν προσεγγιστικά με την σχέση

$$R_{rms} \approx 1.11 Q^{0.384} \quad (\text{εξ. II.12}) \quad \text{όπου}$$

$R_{rms}$  = η μέση τετραγωνική τιμή της τραχύτητας σε microns και

$Q = \text{mm}^3$ , ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού σε  $\text{mm}^3/\text{min}$  [5]

Το επόμενο διάγραμμα δίνει την σχέση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού  $\text{mm}^3$  (εδώ  $V_T$ ) σε συνάρτηση με την τραχύτητα επιφάνειας  $R_t$ .



**Σχ. II.1.8** Ρυθμός αφαίρεσης υλικού  $V_T$  σε σχέση με την τραχύτητα επιφάνειας  $R_t$



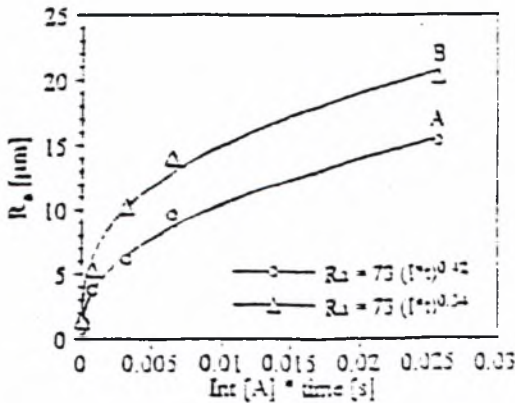
Η επιφανειακή τραχύτητα  $R_a$  (μέση αριθμητική τραχύτητα) από την άλλη, επηρεάζεται άμεσα από το γινόμενο του ρεύματος παλμού  $I$  επί την διάρκεια  $T$  του παλμού, δηλαδή πρακτικά από την ενέργεια του παλμού. Πειράματα που έχουν γίνει επιβεβαιώνουν του λόγου το αληθές. Έτσι από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν με μηχανή EDM τύπου ROBOFORM 200, με εργαλείο από ηλεκτρολυτικό χαλκό, με εξαναγκασμένη ροή υδρογονάνθρακα σαν διηλεκτρικό και με μαρτενσιτικούς βαμμένους χάλυβες A και B σαν τεμάχια κατεργασίας, έδειξαν ότι η τραχύτητα  $R_a$  ακολουθεί μια εμπειρική σχέση της μορφής  $R_a = k [I \times T]^a$  (εξ. II.13) [2]

Η χημική σύσταση των χαλύβων A και B δίδεται στον πίνακα 1 που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Χημική σύσταση δοκιμίων χάλυβα

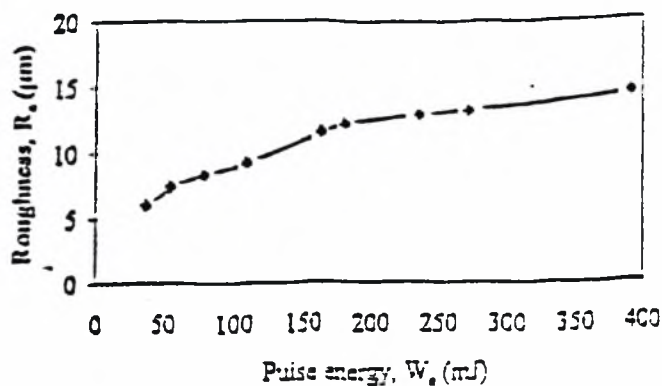
ΧΑΛΥΒΑΣ	ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ % κ.β.					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
A	0.6	0.35	0.8	4.5	0.5	0.2
B	0.38	0.9	0.5	13.6		0.3

ενώ η γραφική παράσταση της ως άνω εμπειρικής σχέσης δίδεται στο διάγραμμα Σχ. II.1.9α κατωτέρω



Σχ. II.1.9α Μεταβολή της επιφανειακής τραχύτητας  $R_a$  σε σχέση με το γινόμενο  $Int$  (= Intensity, ένταση ρεύματος) x time (= χρόνος παλμού) για EDM χάλυβες A και B του πιν. 1 άνω.

Στη συνέχεια δίνουμε την μεταβολή της  $R_a$  σε συνάρτηση με την ενέργεια παλμού  $W_e$  για ηλεκτροδιαβρωμένα δοκίμια από CK60, στο σχ. II.1.9.b. [8]



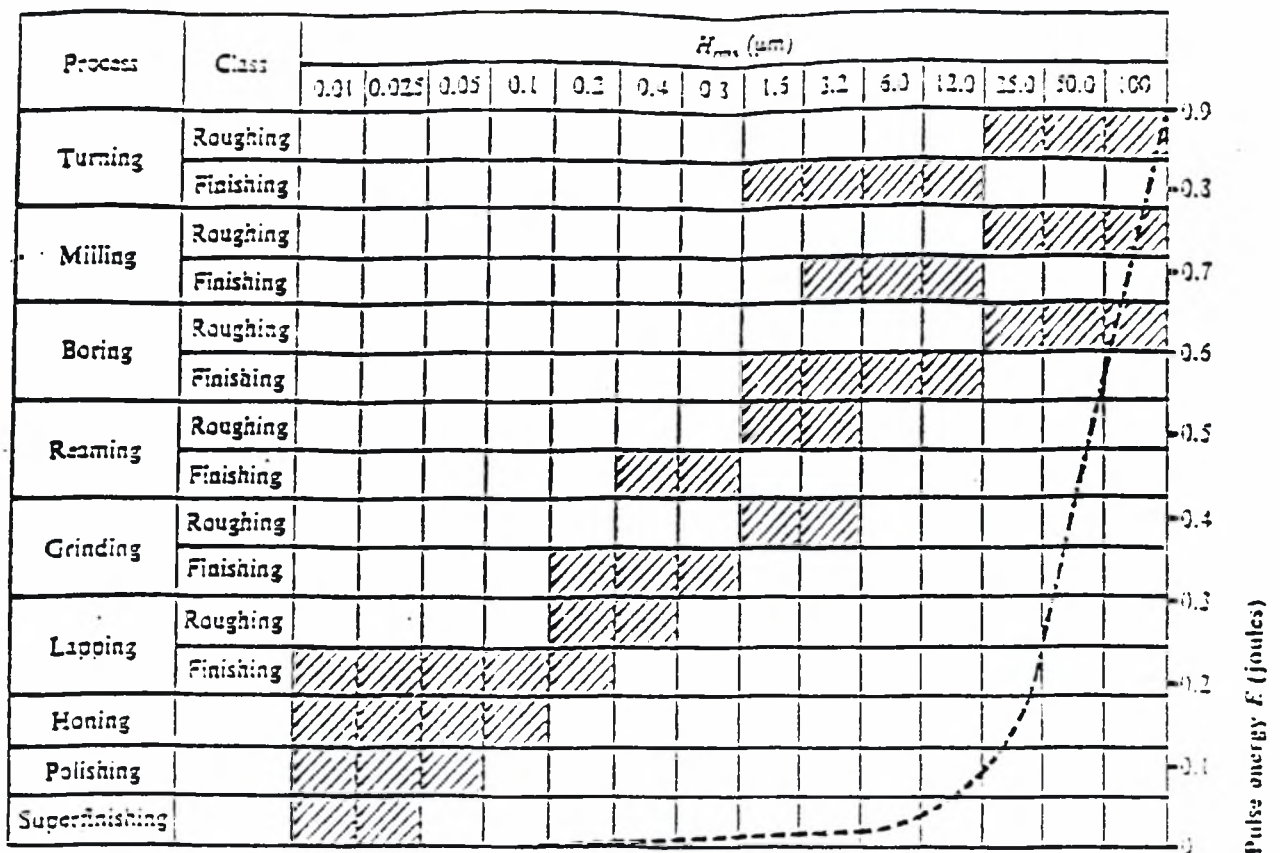
**Σχ. II.1.9.b.** Μεταβολή της τραχύτητας επιφανείας  $R_a$  ως προς την ενέργεια παλμού  $W_e$  για χάλυβα CK60 κατεργασμένο με EDM.

Οι ως άνω καμπύλες επιβεβαιώνονται και από τις πειραματικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας (δες σελ. 132, πολυπαραμετρική ανάλυση  $R_a$  ως προς  $I$ ,  $T$  και  $I \times T$ ).

Πάντως στα βασικά μεγέθη της αποδιδόμενης τραχύτητας επιφανείας του κατεργαζόμενου τεμαχίου ( $R_a$ ,  $R_t$ ) επιδρούν:

- α. Το υλικό του τεμαχίου
- β. Ο ρυθμός αφαιρέσεως υλικού  $mrr$
- γ. Η τραχύτης επιφανείας του εργαλείου
- δ. Το διηλεκτρικό υγρό και ο τρόπος κυκλοφορίας του στην κύρια περιοχή εργασίας.

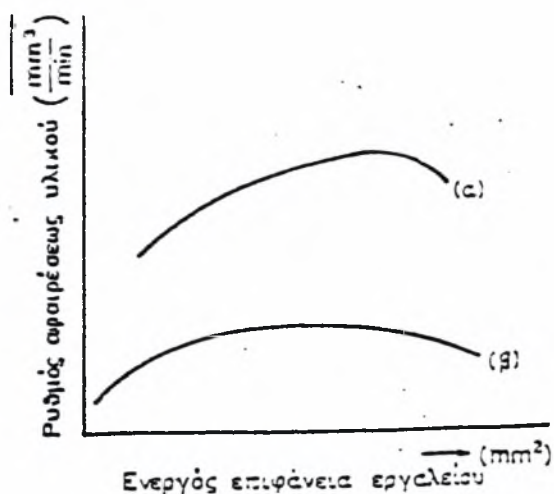
Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) αποδίδει απροσανατόλιστη κατεργασμένη επιφάνεια δηλαδή υφίσταται ανυπαρξία προσανατολισμένων ιχνών, αντίθετα με ότι συμβαίνει με τα ίχνη των συμβατικών εργαλείων κοπής τα οποία αποτυπώνονται με ορισμένη κατεύθυνση. Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει την εξάρτηση της ποιότητας επιφανείας από την ενέργεια  $E$  που απελευθερώνεται ανά παλμό (διακεκομμένη γραμμή) στην κατεργασία EDM καθώς και μια σύγκριση της ποιότητας επιφανείας που επιτυγχάνεται από την EDM σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται με τις συμβατικές μεθόδους [5]. Είναι εμφανές ότι η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) δίνει πολύ χειρότερης ποιότητας επιφάνειες από τις συμβατικές μεθόδους, εκτός ίσως εκείνων του τορναρίσματος (turning) και του φραιζαρίσματος (milling).



Σχ. II.1.10 Συνάρτηση της ποιότητας επιφάνειας με την ενέργεια παλμού και σύγκριση με συμβατικές κατεργασίες.

Οπωσδήποτε την ποιότητα επιφάνειας του παραγόμενου τεμαχίου επηρεάζει και η ποιότητα επιφάνειας του εργαλείου και άρα και η ανεπιθύμητη – αλλά από την φύση της κατεργασίας αναπόφευκτη – σχετική φθορά του εργαλείου – ηλεκτροδίου. Η φθορά της επιφάνειας του εργαλείου επηρεάζει τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού (mrr) ο οποίος με την σειρά του επηρεάζει και την τραχύτητα  $R_a$  επιφάνειας (δες σχ. II.1.8 σελ. 19). Στο σχήμα II.1.11 που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά η μεταβολή του ρυθμού της κατεργασίας με την αύξηση της ενεργού επιφάνειας του εργαλείου. Μετά από μια ορισμένη κατά περίπτωση, τιμή, η αύξηση της επιφάνειας κατεργασίας οδηγεί σε μείωση αντί αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού, γιατί γίνεται πλέον προβληματική και δύσκολη η κυκλοφορία του διηλεκτρικού στο διάκενο εργαλείου – τεμαχίου [6].

Όσον αφορά τώρα το διηλεκτρικό και τον τρόπο κυκλοφορίας του στο διάκενο, πρέπει να αναφέρουμε πρώτα μερικές ιδιότητες που πρέπει να πληροί αυτό. Έτσι πρέπει να είναι:

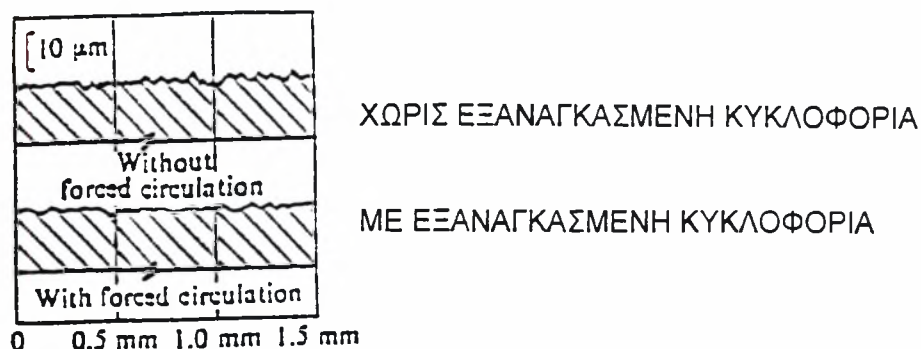


**Σχ. II.1.11** Μεταβολή του ρυθμού αφαίρεσης υλικού με την αύξηση της ενεργούς επιφάνειας του εργαλείου σε εκχονδρίση (α) και τελική κατεργασία (β)

- 1) χαμηλής τιμής δείκτη ιξώδους και μικρής επιφανειακής τάσης (ώστε να κυκλοφορεί γρήγορα και άνετα μέσα στο διάκενο)
- 2) ελεύθερο τοξικών ατμών / αναθυμιάσεων
- 3) χημικώς ουδέτερο έναντι των υλικών τεμαχίου, εργαλείου και μερών της εργαλειομηχανής.
- 4) ελεύθερο τάσεων ανάφλεξης ή υψηλού σημείου ανάφλεξης
- 5) υψηλής τιμής διηλεκτρικής σταθεράς
- 6) χαμηλού κόστους.

Σαν διηλεκτρικά υγρά χρησιμοποιούνται το παραφινέλαιο, το λάδι των μετασχηματιστών, κηροζίνη, υγρή παραφίνη, λάδι σιλικόνης και άλλα ειδικά για τον σκοπό αυτό ορυκτέλαια.

Η εξαναγκασμένη κυκλοφορία του διηλεκτρικού έχει βρεθεί ότι γενικώς βελτιώνει την ποιότητα επιφανείας. Οι τομές σε επιφάνειες ηλεκτροδίων από ορείχαλκο – επιφάνειες που έχουν παραχθεί από EDM με και χωρίς εξαναγκασμένη κυκλοφορία διηλεκτρικού – φαίνονται στο σχ. II.1.12. Τα δεδομένα της κατεργασίας ήταν τάση 40 V, ρεύμα 0,2 A, συχνότητα 1.12 KHz [5]. Είναι ξεκάθαρο ότι η εξαναγκασμένη κυκλοφορία οδηγεί σε μια σημαντική βελτίωση της ποιότητας προφανώς γιατί όταν το διηλεκτρικό ανακυκλοφορεί, απομακρύνει τα στερεοποιούμενα σωματίδια που αφαιρούνται από τους σπινθήρες και δεν τα αφήνει να ξανακολλήσουν στην επιφάνεια και να την κάνουν «άγρια».



**Σχ. II.1.12** Επίδραση της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας στην ποιότητα επιφανείας (φινίρισμα)

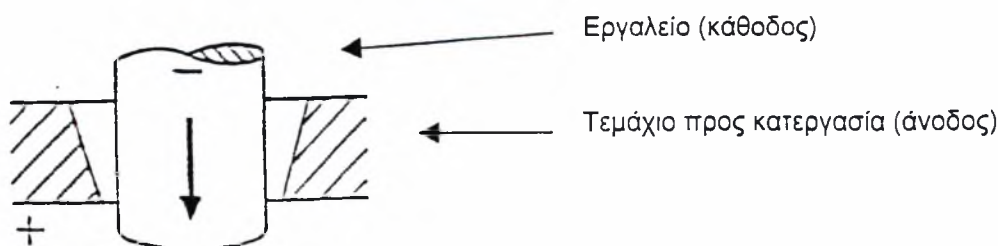
Ένα άλλο στοιχείο σχετικό με το φινίρισμα μιας επιφάνειας που παράγεται από ηλεκτροδιάβρωση είναι οι ανακρίβειες που εισάγονται κατά την λειτουργία της EDM και είναι:

- (i) το κωνικό σχήμα των κατεργαζομένων οπών (taper)
- (ii) η υπέρβαση διαστάσεων στην κοπή οπών / ανοιγμάτων (overcut) και βέβαια,
- (iii) λάθη λόγω της βαθμιαίας λόγω φθοράς αλλαγής στο σχήμα και μέγεθος του εργαλείου (tool electrode wear),

Αναλυτικά: [5]

- (i) Η κωνικότητα των ανοιγομένων οπών.

Καθώς το ηλεκτρόδιο – εργαλείο προωθείται, το σχήμα της κατεργαζόμενης οπής είναι όπως φαίνεται στο σχ. II.1.13α.



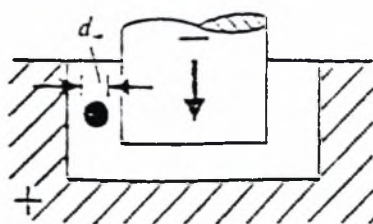
**Σχ. II.1.13α** Κωνικότητα οπών διανοιγόμενων με κατεργασία EDM



Ο κώνος προκύπτει διότι το ανώτερο τμήμα των τοιχωμάτων της οπής υπόκειται σε μεγαλύτερο αριθμό σπινθήρων απ' ό,τι το τμήμα του πυθμένα. Η κωνικότητα έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από το τετράγωνο της διαμέτρου του εργαλείου (στην περίπτωση κυκλικής οπής) με τις άλλες συνθήκες να παραμένουν σταθερές. Το φαινόμενο μπορεί να ελεγχθεί με κατάλληλη μετατροπή των ηλεκτρικών παραμέτρων.

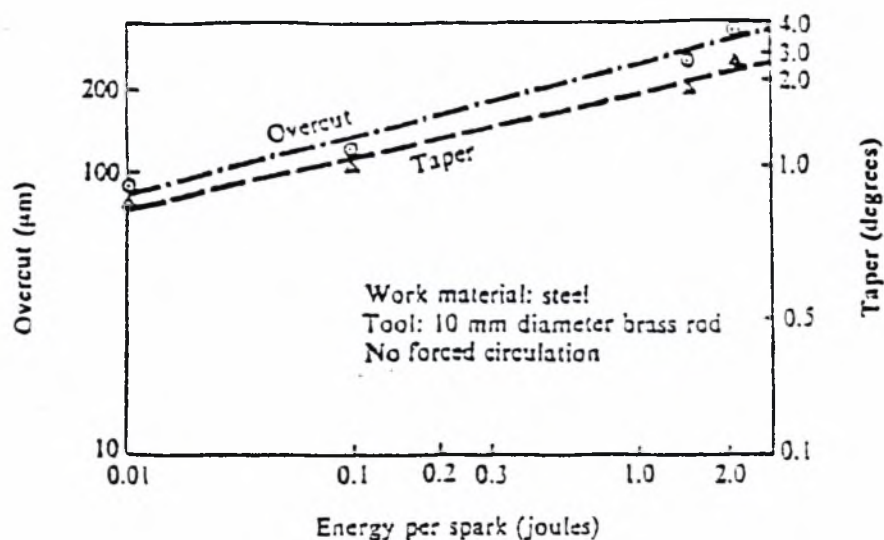
(ii) Η υπέρβαση διαστάσεων (overcut)

Αναφέρεται σε εκείνη τη διάσταση κατά την οποία η οπή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο υπερβαίνει το μέγεθος του ηλεκτροδίου. Το μέγεθος του overcut εξαρτάται από το μήκος του σπινθήρα και σε ένα βαθμό, από τις διαστάσεις του κρατήρα. Όταν τα σωματίδια από την φθορά είναι παρόντα στο διάκενο, το ουσιαστικό μήκος του σπινθήρα (και κατά συνέπεια και το μέγεθος του overcut) μεγαλώνει κατά  $d_w$  (διάμετρος του σωματιδίου λόγω φθοράς), δεξ και σχ. II.1.13β κάτωθι:



Σχ. II.1.13β Επίδραση των σωματιδίων φθοράς στο overcut

Όταν ένα εργαλείο – ηλεκτρόδιο από ορείχαλκο χρησιμοποιείται για κατεργασία χάλυβα (χωρίς εξηναγκασμένη κυκλοφορία), η εξάρτηση της υπέρβασης διαστάσεων και της κωνικότητας από την ενέργεια ανά σπινθήρα φαίνεται στο σχήμα II.1.14 κάτωθι:



Σχ. II.1.14 Επίδραση της ενέργειας σπινθήρα στο overcut (υπέρβαση διαστάσεων) και στο taper (κωνικότητα)

(iii) Η φθορά εργαλείων

Όπως έχουμε αναφέρει, κατά τη διάρκεια της EDM κατεργασίας διαβρώνεται («τρώγεται») και το εργαλείο, δηλαδή η άνοδος. Γενικά τα υλικά με καλά χαρακτηριστικά έναντι της φθοράς ηλεκτροδίου είναι τα ίδια με εκείνα που είναι δύσκολο να κατεργασθούν. Ένα από τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για εργαλεία είναι ο γραφίτης, ο οποίος περνάει κατ' ευθείαν στην αέρια φάση χωρίς να λειώσει. Πάντως με σειρά ηλεκτρικής αγωγιμότητας χρησιμοποιούνται ο ηλεκτρολυτικός χαλκός, και τα κράματά του, ο γραφίτης, ο ορείχαλκος, υλικά κονιομεταλλουργίας όπως χαλκός – γραφίτης, χαλκός – βολφράμιο ή ακόμη και καρβίδιο του βολφραμίου.

Πάντως σαν χαρακτηριστικό μέγεθος εκτιμήσεως της φθοράς του εργαλείου λαμβάνεται ο λόγος  $r_Q$  που ορίζεται σαν:

$$r_Q = \frac{\text{αφαιρούμενος όγκος υλικού εργαλείου ανά εκκένωση}}{\text{αφαιρούμενος όγκος υλικού τεμαχίου ανά εκκένωση}} \times 100(\%)$$

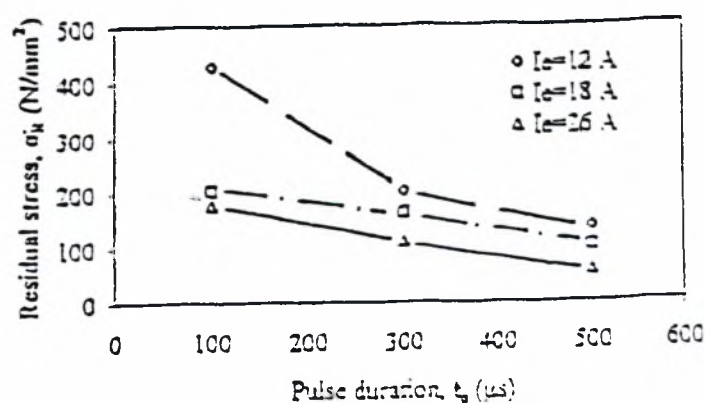
$$= \frac{\text{ρυθμός αφαίρεσης υλικού εργαλείου}}{\text{ρυθμός αφαίρεσης υλικού τεμαχίου}} \times 100 (\%)$$

Έχει βρεθεί ο λόγος  $r_Q$  να σχετίζεται με το  $r_\theta$  (= σημείο τήξεως τεμαχίου / σημείο τήξεως εργαλείου) με την σχέση:  $r_Q = 2,25 r_\theta^{-2.3}$  (εξ. II.14) [5]

## II.2. ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Εκείνο που επίσης συνδέεται με την έννοια της ποιότητας επιφανείας (surface integrity) είναι τα πεδία παραμενουσών τάσεων, η κατανομή σκληρότητας και οι αλλαγές μικροδομών στην επιφάνεια και στο στρώμα κάτω από την επιφάνεια στα κατεργασμένα με EDM τεμάχια.

Όσον αφορά τις παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις, από έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια διεθνώς, φαίνεται ότι αυτές εμφανίζονται στην επιφάνεια του δοκιμίου σε δυο μεταξύ τους κάθετες διευθύνσεις και ταυτόχρονα παράλληλες προς τους άξονες συμμετρίας του δοκιμίου. Μάλιστα οι διαφορές των τιμών των τάσεων αυτών στις δυο διευθύνσεις είναι αμελητέες, πράγμα που επιβεβαιώνει την απουσία κάποιας προτιμητέας κατεύθυνσης από την φθορά που προκαλεί ο σπινθήρας (απροσανατόλιστη κατεργασμένη επιφάνεια).[8] Πάντως γενικά, είναι εμφανής η μείωση των τάσεων στην επιφάνεια με την αύξηση της ονομαστικής ενέργειας του παλμού. Στο σχ. II.2.15 που ακολουθεί, δίδεται η συσχέτιση των τάσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου με τις ανεξάρτητες παραμέτρους της διαδικασίας δηλαδή το ρεύμα παλμού και την διάρκεια παλμού. Η αύξηση τόσο της διάρκειας του παλμού, για ένα δεδομένο ρεύμα παλμού, όσον και του ρεύματος παλμού για μια σταθερή διάρκεια παλμού, οδηγούν σε μείωση των επιφανειακών τάσεων. Η μεταβολή σε όλες τις περιπτώσεις είναι σχεδόν γραμμική [8].



Σχ. II.2.15 Μεταβολή της παραμένουσας επιφανειακής τάσης σε σχέση με την διάρκεια παλμού σε πλακίδια χάλυβα CK60 κατεργασμένα με EDM

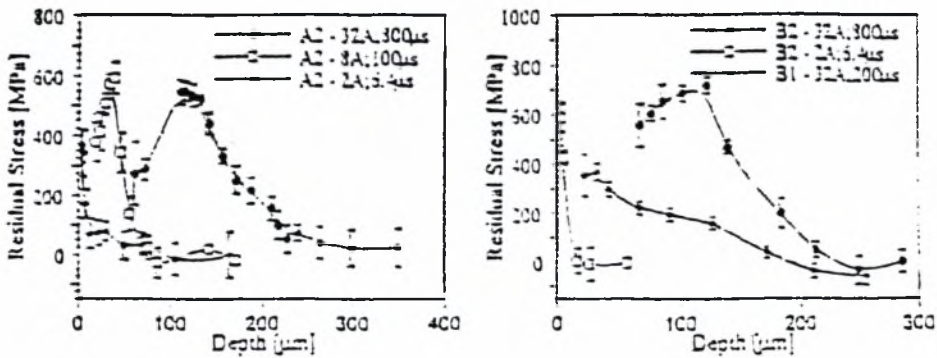
Όλες οι μετρούμενες παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικής φύσεως και συγκριτικά χαμηλές: αυτό αποδίδεται στην εκτεταμένη επιφανειακή ρηγμάτωση, η οποία δρα σαν ένας μηχανισμός ανακούφισης των τάσεων. Οι παραμένουσες τάσεις πάντως που αναπτύσσονται θεωρούνται ότι είναι θερμικής προέλευσης, πρέπει ωστόσο να μην παραβλέπεται και η συνεύρεση τάσεων μετασχηματισμού.

Όμως πρέπει να αναφέρουμε και την μεταβολή των παραμενουσών τάσεων σε σχέση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Θα αναφερθούμε πάλι στα δοκίμια μαρτενσιτικού χάλυβα Α και Β του πιν. 1 σελ. 20 με τις εξής υποδιαίρεσεις των χαλύβων Α και Β:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Υποδιαρέσεις χαλύβων Α και Β

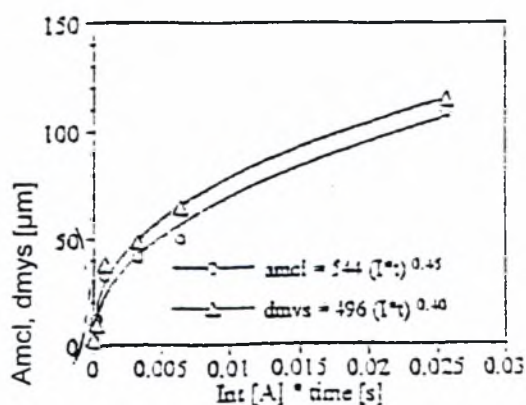
Χαρακτηρισμός υποδιαίρεσης χάλυβα	Θερμική κατεργασία	Μικροσκληρότητα (HV)
A1	Ανοπτημένος	234 ± 14
A2	Εξομαλυσμένος	700 ± 15
B1	Ανοπτημένος	240 ± 11
B2	Εξομαλυσμένος	610 ± 10

Τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ως αυτά του παραδείγματος της σελ. 20. Για EDM δοκίμια από αυτούς τους χάλυβες και αφού αφαιρέθηκε το επιφανειακό (λευκό) στρώμα με ηλεκτρολυτική λείανση, μετρήθηκαν οι παραμένουσες τάσεις[2]. Τα δυο διαγράμματα Σχ. II.2.16α, b που ακολουθούν δίνουν την ζητούμενη εικόνα:



Σχ. II.2.16α,b: Κατανομή των παραμενουσών τάσεων κάτω από την επιφάνεια για δοκίμια Α και Β χάλυβα των πιν. 1 και 2.

Από θεώρηση της κατανομής των τάσεων στα ως άνω διαγράμματα, φαίνεται ότι οι παραμένουσες τάσεις ξεκινούν από χαμηλές τιμές σε μεγάλο βάθος (δηλαδή μέσα στο ανεπηρέαστο βασικό μέταλλο), αυξάνονται σε ένα μέγιστο και κατόπιν μειώνονται πάλι κοντά στην επιφάνεια. Αυτή η μείωση σχετίζεται με την δημιουργία ρωγμών, καθόσον οι παραμένουσες τάσεις υπερβαίνουν την αντοχή θραύσεως του υλικού. Το βάθος που εμφανίζεται η μέγιστη τιμή των τάσεων αντιστοιχεί στο μέσο βάθος που αναπτύσσονται οι θερμικής φύσεως ρωγμές λόγω της EDM. Βέβαια η ανάπτυξη του δικτύου ρωγμών κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων σχετίζεται με την διαδικασία ανακούφισης των τάσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια εκφόρτισης κυρίως επηρεάζει το βάθος στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή των παραμενουσών τάσεων: όσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος. Έτσι το επίπεδο (η ένταση) των επιφανειακών παραμενουσών τάσεων μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας παλμού. Ειδικά για δοκίμια από χάλυβες A2 έχουν προσδιοριστεί σχετικές εμπειρικές σχέσεις μεταξύ τόσο του μέσου μέγιστου μήκους ρωγμών (amcl) όσο και του βάθους της μέγιστης τιμής τάσεως (dmsv) έναντι του γινομένου ρεύματος επί χρόνο [ $\text{Int}(A) \cdot \text{time}(s)$ ]. Το κάτωθι διάγραμμα Σχ. II.2.17 δίνει μια εικόνα του γεγονότος αυτού [2].

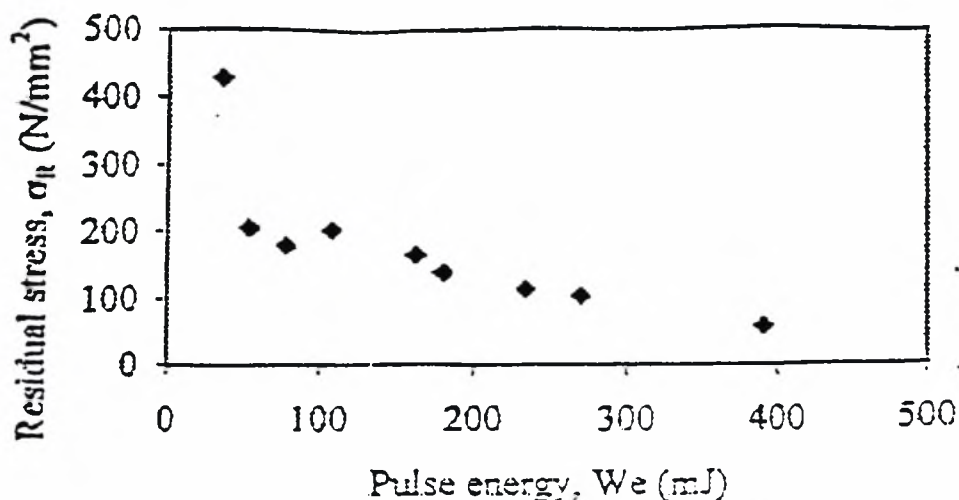


Σχ. II.2.17: Μεταβολή του μέσου μέγιστου μήκους ρωγμών (amcl) και του βάθους μέγιστη τιμή της τάσης (dmsv) σε σχέση με το γινόμενο  $I \times T$  για χάλυβα A2 EDMed

Επειδή χοντρικά το γινόμενο του ρεύματος παλμού (εκκένωσης) επί την διάρκεια του παλμού δίνουν την ενέργεια  $W_e$  του παλμού, το διάγραμμα σχ. II.2.18 που ακολουθεί, δίνει τις τρεις καμπύλες του σχ. II.2.15 σε μία [9]. Αυτή επιβεβαιώνει



αυτό που αναφέρθηκε πριν, ότι δηλαδή η αύξηση της ενέργειας παλμού, οδηγεί γενικά σε μείωση των παραμενουσών τάσεων.



Σχ. II.2.18 Μεταβολή των παραμενουσών επιφανειακών τάσεων σε σχέση με την ενέργεια παλμού για EDM κατεργασμένες πλάκες χάλυβα CK60.

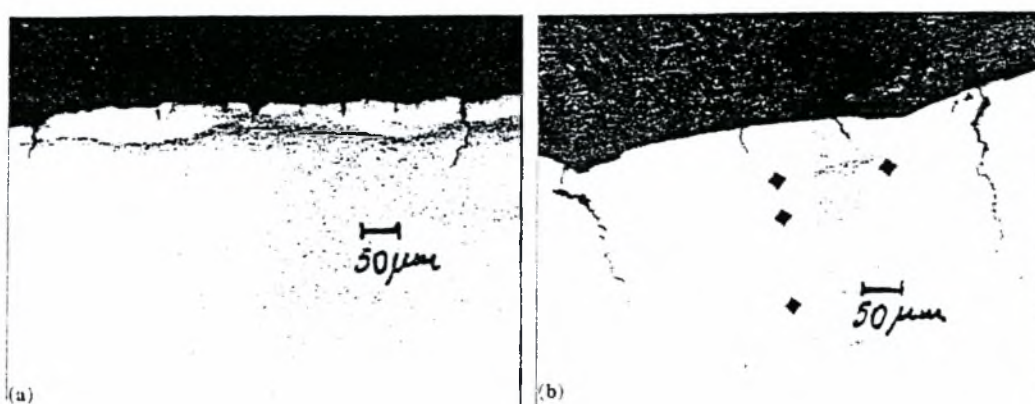
Οι ζώνες μετασχηματισμού που προκύπτουν από κατεργασία EDM (ηλεκτροδιάβρωση) είναι θερμικής προέλευσης, όπως αναφέραμε, εντούτοις μπορούν να ανιχνευτούν και δευτερεύουσες μηχανικές επιδράσεις. Το επιφανειακό στρώμα που προκύπτει από την δράση των εκφορτίσεων είναι μεταβλητού πάχους, αλλά μέσα του μπορούν να αναγνωριστούν τρεις ξεχωριστές ζώνες, τουλάχιστον για παλμούς μέσης και υψηλής ενέργειας: το εξώτατο επαναστεροποιημένο στρώμα, (ή «λευκό στρώμα») η ενδιάμεση ζώνη θερμικής επιρροής (HAZ, Heat Affected Zone) και το κάτωθεν αυτής ανεπηρέαστο βασικό μέταλλο.

Το κοινώς περιγραφόμενο «λευκό στρώμα» παρατηρήθηκε κατά μήκος των επιφανειών των δοκιμίων EDM για όλες τις εφαρμοζόμενες ενέργειες παλμού και αποδόθηκε στην ταχύτατη μερική στερεοποίηση του λειωμένου υλικού που αποβάλλεται από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σε πολλές περιπτώσεις το «λευκό στρώμα» εμφανίστηκε να είναι συνεχές και σχεδόν σταθερού πάχους, ενώ σε δοκίμια που κατεργάστηκαν με χαμηλή ενέργεια παλμού ήταν ασυνεχές. Η μορφολογία του «λευκού στρώματος» ομοιάζει στενά με εκείνη που σχηματίζεται από μηχανικές κατεργασίες σε παρόμοια υλικά, παρόλα αυτά στην δική μας περίπτωση η θερμική προέλευση είναι έντονη, είναι δε μαρτενσιτικής δομής.

Η επιφανειακή καταστροφή των EDM κατεργασμένων δοκιμίων εμφανίζεται σαν σχηματισμός ρωγμών (crack formation) συνδυασμένων με την ανάπτυξη υψηλών θερμικών τάσεων οι οποίες υπερβαίνουν την αντοχή θραύσεως του υλικού.

Οι ρωγμές κυρίως είναι κάθετες προς την κατεργασμένη επιφάνεια, πολύ συχνά διατρέχουν το συνολικό βάθος του «λευκού στρώματος», ιδίως όταν χρησιμοποιούνται παλμοί υψηλής ενέργειας, και μερικές φορές συνεχίζουν και μέσα στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.

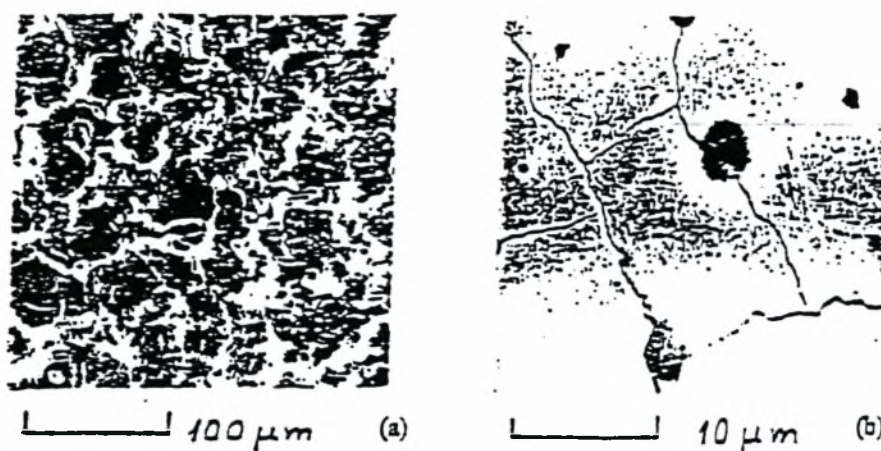
Τα σχήματα II.2.19(α) και (β) που ακολουθούν προέρχονται από δοκίμια χάλυβα A2 (δες και πίνακες 1 και 2 πριν) κατεργασμένα με EDM χαμηλής το (α) και υψηλής το (β) ενέργειας παλμού. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι σε υψηλές ενέργειες παλμού οι ρωγμές συνεχίζουν και μέσα στα θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη [2].



**Σχ. II.2.19** Διατομές δοκιμίων από A2 χάλυβα παραχθείσες από EDM με παραμέτρους κατεργασίας:  
 (α) 16A και 200  $\mu\text{sec}$   
 (β) 32A και 800  $\mu\text{sec}$

Επίσης παρατηρούνται υποεπιφανειακές βλάβες υπό την μορφή πόρων και ρωγμών στην διεπιφάνεια μεταξύ της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και του βασικού μετάλλου. Τέλος να προσθέσουμε ότι οι μικρορωγμές αυτές – οι οποίες είναι το δεσπόζον χαρακτηριστικό στο λευκό στρώμα – φαίνονται να εκτείνονται ακτινικά ξεκινώντας από τους κρατήρες αλλά και να τους παρακάμπτουν.

Στις δύο εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η τυπική επιφανειακή υφή δοκιμίων EDM.[8] Στο σχ. II.2.20(α) φαίνεται μια EDM επιφάνεια χάλυβα CK60 κατεργασμένη με ενέργεια παλμού  $W_e = 54 \text{ mJ}$ . Φαίνονται τα σφαιρικά σωματίδια καθώς και οι φυσαλίδες στα πλευρά των κρατήρων προερχόμενες από την επαναστερεοποίηση των μεταλλικών σταγόνων. Στο σχ. II.2.20 (b) έχουμε επιφάνεια CK60 δοκιμίου κατεργασμένου με EDM και ενέργεια παλμού  $W_e = 390 \text{ mJ}$ , πολύ υψηλότερη. Εδώ είναι εμφανείς οι επιφανειακές ρωγμές που διατρέχουν το δοκίμιο.

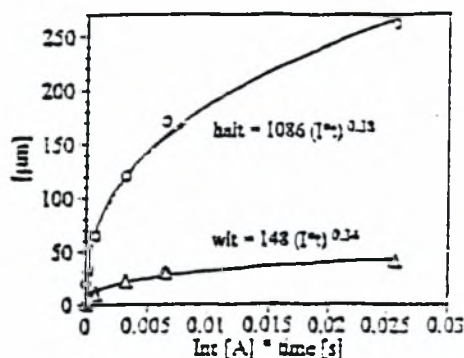


**Σχ. II.2.20** Μικρογραφίες ηλεκτρονικής σάρωσης τυπικής επιφανειακής υφής λόγω EDM, σε δοκίμια χάλυβα CK60.

Σε EDM δοκίμια εντούτοις που έχουν παραχθεί με χαμηλής ενέργειας παλμούς, εντοπίζεται μεν το εξώτερο επαναστερεοποιηθέν επιφανειακό στρώμα, όμως δεν παρατηρείται μια ευδιάκριτη μεταβατική θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη μεταξύ του επαναστερεοποιημένου «λευκού στρώματος» και του ανεπηρέαστου μετάλλου βάσεως. Θεωρείται ότι σε αυτή την περίπτωση, η (ελαττωμένη) θερμική ενέργεια που διοχετεύεται στο διάκενο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του αντικειμένου κατεργασίας, καταναλώνεται για την τοπική επιφανειακή τήξη. Κατά συνέπεια η ροή θερμότητας προς τα υπο – επιφανειακά στρώματα δεν είναι αρκετή για τον σχηματισμό μιας θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης.

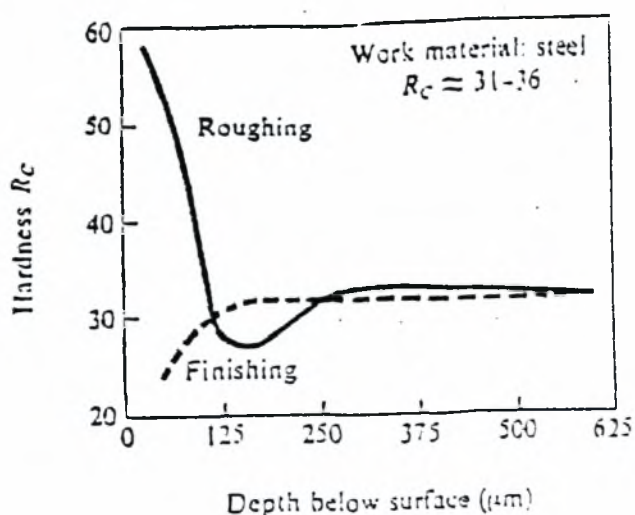
Βέβαια πρέπει να αναφέρουμε ότι η ενέργεια παλμού (ή ισοδυνάμως το γινόμενο  $I \times T$ ) επηρεάζει το πάχος των δυο εξωτερικών στρωμάτων που σχηματίζονται στα EDM δοκίμια, δηλαδή του «λευκού στρώματος» και της «θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης». Ξαναγυρίζοντας στα πειράματα με χάλυβα A2 που αναφέραμε στις προηγούμενες σελίδες, μετρήσεις σε κάθετες τομές και σε διάφορα σημεία τέτοιων EDM δοκιμίων έδωσαν συσχέτιση των δύο αυτών παχών με το γινόμενο  $I \times T$ . Η προσβολή των τομών με αντιδραστήριο Nitral άφησε το «λευκό στρώμα» χαρακτηριστικά λευκό, ενώ η παλινδρομική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδωσε για το πάχος του λευκού στρώματος  $wlt$  (white layer thickness) σχέση της μορφής:  $wlt = 148 \times [I \times T]^{0.34}$  με υψηλή συσχέτιση  $r^2 = 0,996$ . Παρόμοια εμπειρική σχέση έδωσαν οι παλινδρομήσεις και για το πάχος  $halt$  (heat affected layer thickness) της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης. Και αυτό ισχύει για ευρεία γκάμα

υλικών εργαλείου. Το σχετικό διάγραμμα που τα αναπαριστά αυτά είναι το σχ. II.2.21 που ακολουθεί. [2]



**Σχ. II.2.21** Μεταβολή του πάχους «λευκού στρώματος» (wlt) και του πάχους της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (halt) σε σχέση με το γινόμενο ρεύματος (Int) x χρόνο (time) για δοκίμια EDMed από χάλυβα A2

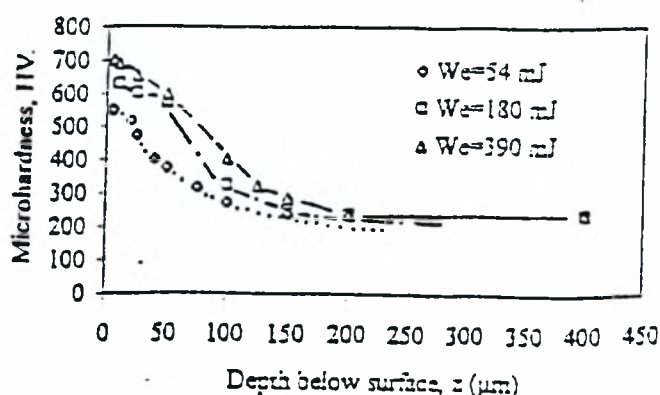
Προφανώς η υψηλή θερμοκρασία που προκαλούν οι σπινθήρες επηρεάζει τις ιδιότητες των στρωμάτων (2,5 – 150 μm) κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Το έξω – έξω στρώμα ψύχεται τάχιστα και κατά συνέπεια είναι πολύ σκληρό. Το στρώμα αμέσως κάτω από αυτό είναι κατά κάποιον τρόπο σε κατάσταση ανόπτησης. Το σχήμα II.2.22 που ακολουθεί δείχνει την μεταβολή της σκληρότητας σε συνάρτηση με το βάθος τόσο για χονδροειδή (rough) κατεργασία όσο και για τελική (φινίρισμα) με EDM σε χάλυβα. [5]



**Σχ. II.2.22** Επίδραση της EDM στην υποεπιφανειακή σκληρότητα



Γενικώς, η μικροσκληρότητα κοντά στην επεξεργασμένη επιφάνεια είναι προσεγγιστικά 2 έως και 3 – 4 φορές υψηλότερη από αυτή στο μέταλλο βάσης, μειούμενη ταχύτατα προς την αρχική της τιμή. Επίσης η μέγιστη τιμή της μικροσκληρότητας αυξάνεται με την ενέργεια εκφόρτισης, και πάντως η ζώνη ανεβασμένης μικροσκληρότητας δεν εκτείνεται σε βάθος μεγαλύτερο από 200  $\mu\text{m}$ , ενδεικτικό του βάθους μέχρι το οποίο το υλικό επηρεάζεται από το θερμικό φορτίο της EDM. Το διάγραμμα σχ. II.2.23 που ακολουθεί αναπαριστά τις τελευταίες αυτές παρατηρήσεις [8]. Να πούμε επίσης ότι παρατηρήσεις μέσω μικροσκοπίου του κατεργασμένου υλικού αποκαλύπτουν την συνύπαρξη μαρτενσίτη, ο οποίος είναι μη ανιχνεύσιμος με την τεχνική περίθλασης των ακτινών X, καθώς και δενδριτικών δομών προσανατολισμένων κάθετα προς την επιφάνεια. Ο σχηματισμός του «λευκού στρώματος» που έχουμε αναφέρει και πριν, γενικώς συνδέεται με τον επιφανειακό εμπλουτισμό με άνθρακα προερχόμενο από την πυρόλυση / διάσπαση του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού.

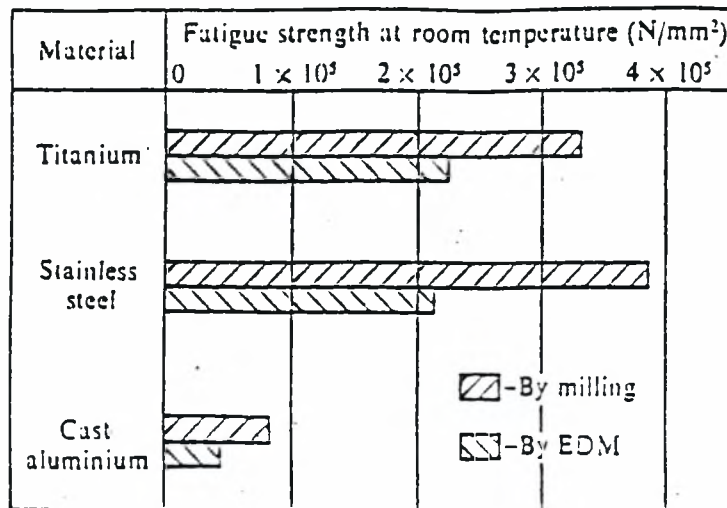


Σχ. II.2.23 Μεταβολή της μικροσκληρότητας με το βάθος κάτω από επιφάνειες CK60 χάλυβα κατεργασμένες με EDM

Η σκλήρυνση του επιφανειακού στρώματος κατά την διάρκεια της EDM λειτουργίας συνεπάγεται καλύτερα χαρακτηριστικά αντίστασης στην φθορά. Εντούτοις η αντοχή κόπωσης μειώνεται λόγω των μικρορωγμών που αναπτύσσονται στο επιφανειακό στρώμα κατά την διάρκεια της ψύξης. Το σχήμα II.2.24 που ακολουθεί παρουσιάζει την σύγκριση μεταξύ της αντοχής κόπωσης ταυτόσημων μερών (δοκιμίων) που παράγονται από συμβατικό φρεζάρισμα και από λειτουργία EDM. Από την άλλη οι ιδιότητες των λεπτών επιφανειακών στρωμάτων δεν έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην αντοχή θραύσεως. Η δομή τους μετασχηματίζεται και, λόγω



των σπινθήρων, η χημική τους σύσταση αλλοιώνεται κατά κάποιο τρόπο. Αυτό γενικά μειώνει την αντίσταση σε διάβρωση [5].



**Σχ. II.2.24** Επίδραση της EDM στην αντοχή κόπωσης (fatigue strength) του τεμαχίου κατεργασίας

### **III. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ EDM ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ – ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ (ΑΠΛΑ ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΑ) – ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ – ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ EDM.**

#### **III.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) είναι μια αρκετά διαδεδομένη μέθοδος κατεργασίας μεταλλικών επιφανειών στις μέρες μας. Όμως υπάρχουν αρκετά κενά στην διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τις τριβολογικές ιδιότητες των EDM επιφανειών αλλά και με το πώς οι συνθήκες κατεργασίας επηρεάζουν αυτές τις ιδιότητες (δηλαδή τις παραμέτρους τραχύτητας και κυμάτωσης).

Έτσι λοιπόν η παρούσα εργασία είναι προσανατολισμένη προς αυτούς τους στόχους και γι' αυτό είναι δομημένη και στα εξής στάδια:

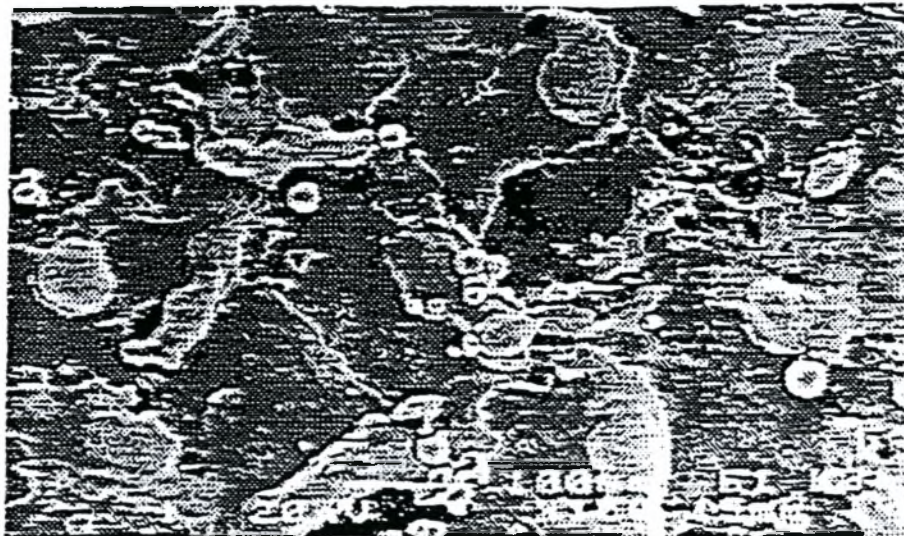
- α) Μέτρηση των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης σε δεδομένα ηλεκτροδιαβρωμένα δοκίμια χάλυβα CK60 και καταγραφή των αποτελεσμάτων.
- β) Πολυπαραμετρική ανάλυση των παραμέτρων επιφανείας και δημιουργία στατιστικών μοντέλων παλινδρόμησης (απλών και πολυμεταβλητών).
- γ) Επιβεβαίωση ισοτροπίας παραγόμενων από EDM επιφανειών
- δ) Έλεγχος τριβολογικής συμπεριφοράς EDM επιφανειών με πειραματικές δοκιμές τριβής και φθοράς και διερεύνηση του πώς οι συνθήκες κατεργασίας (ήτοι το ρεύμα και η διάρκεια παλμού) επηρεάζουν τον συντελεστή τριβής και την φθορά επιφάνειας.
- ε) Τελικά συμπεράσματα.

#### **III.2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ EDM ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**

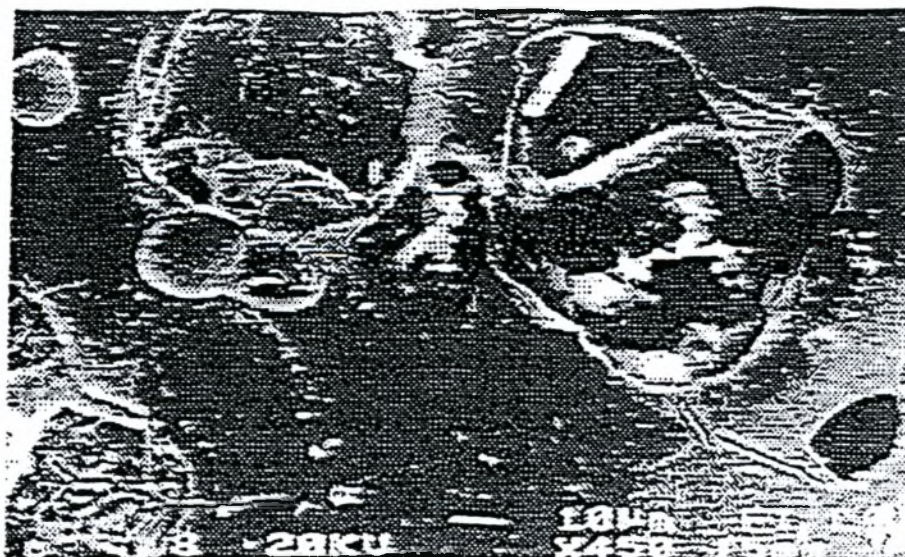
Όπως έχουμε αναφέρει, η μορφολογία των ηλεκτροδιαβρωμένων (EDM) επιφανειών σχετίζεται με έναν πολύπλοκο μηχανισμό διάβρωσης θερμικής προέλευσης, ο οποίος περικλείει ιονισμό και σχηματισμό τόξου στην περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων, τοπική τήξη και ατμοποίηση. Έτσι οι κατεργασμένες επιφάνειες

σκεπάζονται από κατά τυχαίο τρόπο αλληλοκαλυπτόμενους κρατήρες διαστάσεων αναλόγων της ενέργειας του παλμού, των οποίων βέβαια οι διαστάσεις και θέσεις αντανakλούν την στοχαστική φύση της κατεργασίας. Γενικά η υφή των EDM επιφανειών χαρακτηρίζεται σαν «άδεια», «ανοικτή», «απότομη» και «τυχαία».

Τυπικές επιφανειακές δομές δοκιμίων από χάλυβα CK60, κατεργασμένες με EDM φαίνονται στα σχήματα σχ. III.2.1 και III.2.2 που ακολουθούν [9].



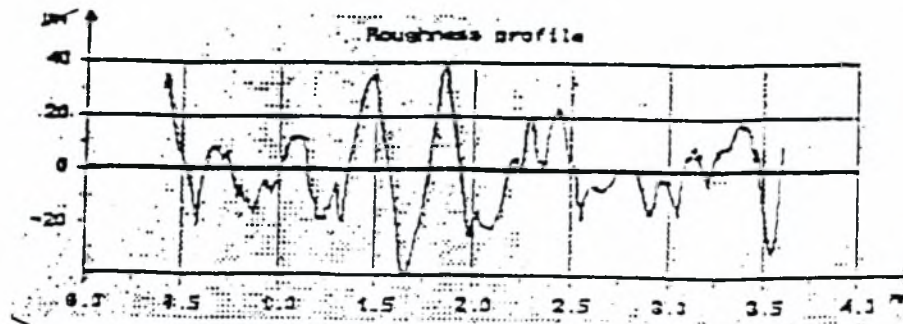
Σχ. III.2.1. Μικρογραφία ηλεκτρονικής σάρωσης ενός τυπικού επιφανειακού ιστού δοκιμίου, κατεργασμένου με EDM και ενέργεια παλμού  $W_e = 36 \text{ mJ}$



Σχ. III.2.2 Μικρογραφία ηλεκτρονικής σάρωσης της μορφολογίας επιφάνειας με ρωγμές, δοκιμίου που υπέστη εκχόνδριση με EDM και με ενέργεια παλμού  $W_e = 390 \text{ mJ}$



Συνήθως για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε ποσοτικά την επίδραση των παραμέτρων της EDM στο φινίρισμα μιας επιφάνειας, προχωράμε σε μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης. Είδαμε ήδη ότι η επιφανειακή τραχύτητα  $R_a$  αυξάνει με την αύξηση της ενέργειας παλμού. Ένα τυπικό προφίλ μιας EDM επιφάνειας φαίνεται στο σχ. III.2.3 που ακολουθεί [9]:



Σχ. III.2.3 Προφίλ επιφάνειας ενός EDM δοκιμίου από χάλυβα CK60 (ενέργεια παλμού  $W_p = 390 \text{ mJ}$ )

Πριν όμως προχωρήσουμε στην παρουσίαση των πειραματικών δεδομένων, κρίνουμε σκόπιμο να κάνουμε μια σύντομη ανάλυση των κυριότερων παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωση που επελέγησαν να μετρηθούν και να καταγραφούν κατά την διάρκεια των πειραμάτων αυτής της εργασίας. Αυτές είναι οι κάτωθι:

#### Α) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

##### 1) Μέση αριθμητική τραχύτητα $R_a$

Ορίζεται από την σχέση  $R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y| dx$  και παριστάνει την μέση τιμή των

αποκλίσεων  $|y|$  όλων των σημείων της πραγματικής κατανομής από την κεντρική γραμμή μέσα στο δεδομένο δειγματοληπτικό μήκος  $L$ . Είναι η πλέον διαδεδομένη διεθνώς παράμετρος ποσοτικού χαρακτηρισμού της τραχύτητας δεδομένης επιφάνειας, μετριέται εύκολα με άμεση ηλεκτρική ολοκλήρωση από τα τραχύμετρα και η γνώση της παρέχει μια χρήσιμη μέση τιμή, τόσο για την συναφή κατεργασία παραγωγής της επιφάνειας όσο και για την λειτουργική της συμπεριφορά. Όμως δεν δίνει πληροφορίες για το πραγματικό ύψος των ανωμαλιών και δεν έχει ιδιαίτερη φυσική έννοια. Μετριέται σε  $\mu\text{m}$  και είναι παράμετρος εύρους.

## 2) Μέσο βάθος $R_{ZDIN}$

Είναι η μέση τιμή της απόστασης μεταξύ των πέντε υψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων. Μέσω αυτής της παραμέτρου μειώνουμε την επίδραση των τυχαίων ανωμαλιών, σε αντίθεση με την παράμετρο  $R_i$  όπου το γεγονός αυτό είναι αναπόφευκτο. Είναι και αυτή παράμετρος εύρους.

## 3) Παράμετρος $R_{DelQ}$

Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως η μέση τιμή των τετραγώνων όλων των τοπικών κλίσεων.

## 4) Παράμετρος $R_{Sm}$

Η  $R_{Sm}$  είναι ο μέσος όρος των διαστημάτων μεταξύ των κορυφών του περιγράμματος κατά μήκος της κεντρικής γραμμής και υπολογίζεται στο δειγματοληπτικό μήκος. (Μια κορυφή είναι το υψηλότερο σημείο ανάμεσα σε ένα προς τα πάνω και ένα προς τα κάτω πέρασμα του περιγράμματος από την κεντρική γραμμή). Η  $R_{Sm}$  είναι παράμετρος διαστήματος.

## 5) Παράμετρος $R_{SK}$ ή λοξότητα

Η λοξότητα  $R_{SK}$  δίνει τον βαθμό ασυμμετρίας σε περιπτώσεις ασυμμετρικών στατιστικών κατανομών και χαρακτηρίζεται αναλόγως ως θετική ή αρνητική. Θετική λοξότητα εμφανίζουν επιφάνειες «άδειες από υλικό», ενώ αρνητική επιφάνειες «γεμάτες από υλικό». Είναι σημαντική παράμετρος για τριβολογικές εφαρμογές, όπως στην λειτουργικότητα επιφανειών εδράσεως, σε έλεγχο φθοράς, όπου οι χαρακτηριζόμενες από θετική λοξότητα επιφάνειες φθείρονται ταχύτερα κ.ά. Η κανονική κατανομή παρουσιάζει  $R_{SK} = 0$ . Η λοξότητα είναι στατιστική παράμετρος.

## 6) Παράμετρος $R_{Ku}$ ή κύρτωση

Η κύρτωση  $R_{Ku}$  δίνει τον βαθμό οξύτητας της στατιστικής κατανομής και λαμβάνει την τιμή  $\xi = 3$  για την κανονική κατανομή. Στην περίπτωση που  $\xi > 3$ , η επιφάνεια χαρακτηρίζεται από οξύτητα προεξοχών, ενώ όταν  $\xi < 3$  χαρακτηρίζεται από αμβλύτητα. Παρέχονται έτσι πληροφορίες για την επιφάνεια επαφής και την αντίστασή της σε φθορά, καθώς είναι δυνατόν να εντοπισθεί περιοδικότητα του περιγράμματος ( $\xi < 3$ ). Η κύρτωση είναι και αυτή στατιστική παράμετρος.



## 7) Μέγιστο βάθος $R_t$

Είναι η υψομετρική διαφορά της υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών από την βαθύτερη κοιλάδα (εντός του δειγματοληπτικού μήκους). Το μέγεθος  $R_t$  μετριέται πολύ εύκολα, έχει όμως το μειονέκτημα να παρουσιάζει ευαισθησία σε τυχαίες τοπικές ανωμαλίες (π.χ. αμυχή στην επιφάνεια) που βρίσκονται συμπτωματικά μέσα στο μήκος δειγματοληψίας.

## B) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ

Η κυμάτωση αναφέρεται σε ανωμαλίες της νεοκατεργασμένης επιφάνειας που οφείλονται σε αποκλίσεις πρώτης και δεύτερης τάξης, δηλαδή ανωμαλίες μεγάλου μήκους κύματος (ενδεικτικού μεγέθους 0,5 – 100  $\mu\text{m}$ ). Στην κυμάτωση ωστόσο δεν έχουμε δώσει μεγάλη βαρύτητα, κυρίως γιατί οι περισσότερες παράμετροι της τραχύτητας περιέχουν υπολογιστικά μέρη της κυμάτωσης και όχι γιατί έχει μικρότερη σημασία. Η διαφορά μεταξύ της τραχύτητας και της κυμάτωσης είναι μόνο την κλίμακα αν και οι αιτίες και τα αποτελέσματα δεν είναι τα ίδια. Το cut – off στο οποίο υπολογίζεται η κυμάτωση αναφέρεται στο μήκος κάτω του οποίου αποκόπτονται οι ανωμαλίες, ωστόσο το δειγματοληπτικό μήκος πρέπει να είναι μεγαλύτερο του cut – off. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική και πρέπει να τηρείται κάθε φορά που επιλέγεται το cut – off μήκος για την μέτρηση της κυμάτωσης. Το ανώτερο όριο του δειγματοληπτικού μήκους συνήθως καθορίζεται από το μέγιστο διαθέσιμο συνολικό μήκος σάρωσης του στυλίσκου παρά από την ανάγκη να μην συμπεριλάβουμε αποκλίσεις μορφής. Οι παράμετροι της κυμάτωσης συμβολίζονται με το γράμμα W. Τυπικές παράμετροι κυμάτωσης είναι οι  $W_a$ ,  $W_{zDIN}$ ,  $W_{delQ}$ ,  $W_{Sm}$ ,  $W_{sk}$ ,  $W_{ku}$ , οι οποίες είναι αντίστοιχες των παραμέτρων τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{delQ}$ ,  $R_{Sm}$ ,  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  που αναπτύξαμε προηγουμένως.

Να αναφέρουμε εδώ και κάποια άλλα μεγέθη που θα εμφανισθούν στην εργασία αυτή. Αυτά είναι:

- i) Το δειγματοληπτικό μήκος, είναι το μήκος της επιφάνειας στο οποίο γίνεται μια απλή εκτίμηση των παραμέτρων. Είναι το μήκος στο οποίο μετριέται η παράμετρος, έχει στατιστική σημασία χωρίς να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιλαμβάνει τυχαίες λεπτομέρειες.
- ii) Το υπολογιζόμενο ή εκτιμώμενο μήκος, είναι το μήκος της επιφάνειας που γίνεται η μέτρηση. Μπορεί να περιλαμβάνει διάφορα δειγματοληπτικά μήκη. Η τελική μέτρηση είναι η μέση αριθμητική τιμή των επιμέρους μετρήσεων που έγιναν σε κάθε ένα από τα δειγματοληπτικά μήκη του υπολογιζόμενου μήκους.

- iii) Το συνολικό μήκος σάρωσης του στυλίσκου κατά την μέτρηση. Είναι μεγαλύτερο από το υπολογιζόμενο μήκος, αφού περιλαμβάνει και τα διαστήματα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του στυλίσκου στα οποία δεν γίνεται μέτρηση.

Τέλος ένα άλλο χαρακτηριστικό μήκος επίσης μεγάλης σπουδαιότητας είναι το μήκος cut – off. Αυτό είναι ισοδύναμο με το δειγματοληπτικό μήκος. Η διάκριση μεταξύ του cut – off και του δειγματοληπτικού μήκους είναι πολύ σημαντική. Το δειγματοληπτικό μήκος είναι ένα φυσικό μήκος της επιφάνειας. Το cut – off είναι το μέσον, διαμέσω του οποίου η κυματομορφή του δημιουργούμενου περιγράμματος γίνεται για να προσομοιώσει το αποτέλεσμα του περιορισμού της εκτίμησης στο δειγματοληπτικό μήκος. Για ευκολία το cut – off αναφέρεται ως ισοδύναμο δειγματοληπτικό μήκος.

### **III.3. ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ**

#### **ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ (ΑΠΛΑ ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΑ) – ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ**

Για τις πειραματικές ανάγκες της εργασίας αυτής είχαμε στην διάθεσή μας δώδεκα (12) ηλεκτροδιαβρωμένα δοκίμια (πλακίδια) διαστάσεων 70mm x 70mm x 10mm. Η κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης εκτελέστηκε με μηχανή HOSTEK SH – 38GP (ZNC – P τύπου) και με τάση λειτουργίας 30 V. Οι λειτουργικές παράμετροι που εφαρμόστηκαν, δηλαδή το ρεύμα του ηλεκτρικού παλμού  $I_e$  και ο χρόνος του παλμού  $T_e$ , ήσαν τα ακόλουθα:

$$I_e = 5, 10, 20, 30 \text{ A}$$

$$T_e = 100, 300, 500 \text{ } \mu \text{ sec.}$$

Είχαμε δηλαδή  $4 \times 3 = 12$  συνδυασμούς ρεύματος – χρόνου όσο και τα δοκίμια ήτοι κάθε δοκίμιο αντιπροσώπευε και έναν συνδυασμό. Το δοκίμιο ήσαν από ανθρακούχο χάλυβα CK60. Ο CK60 είναι καθαρός ανθρακούχος χάλυβας κατασκευών ευρείας χρήσης με καλή κατεργαστικότητα, για τον οποίο υπάρχουν αρκετά δημοσιευμένα στοιχεία. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	% κ. β.
Άνθρακας C	0,57 – 0,65
Πυρίτιο Si	< 0,4
Μαγγάνιο Mn	0,6 – 0,9
Φώσφορος P	0,045
Θείο S	< 0,043

Οι κυριότερες φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες είναι:

Πυκνότητα $\rho$	7.800 kg/m <sup>3</sup>
Θερμική αγωγιμότητα $\lambda$	46,8 W/m°C
Θερμοδιαχυτότητα $\alpha$	0,00001278 m <sup>2</sup> /sec
Ειδική Θερμότητα $C$	544 J/hgr°C
Τάση εφελκυσμού	70 – 80 kp/mm <sup>2</sup>
Επιμήκυνση	13 mm
Σκληρότητα	220 HV

Προφανώς οι ως άνω δώδεκα συνδυασμοί ρεύματος – χρόνου αντιστοιχούν και σε δώδεκα διαφορετικές ενέργειες παλμού  $W_e$  ή ενέργειες ηλεκτρικής εκκενώσεως (να θυμηθούμε ότι η ενέργεια εκκενώσεως  $W_e$  εκφράζεται ως:

$$W_e = \int_0^{T_e} V(t) I_e(t) dt, \text{ ένθα } V(t) = \text{η εφαρμοζόμενη τάση}$$

Σε πρώτη φάση προχωρήσαμε σε πολυπαραμετρική ανάλυση τραχύτητας των 12 επιφανειών – δοκιμών. Προς τούτο χρησιμοποιήσαμε ένα Rank Taylor – Hobson Talysurf 3T προφιλόμετρο εξοπλισμένο με λογισμικό Talysprofile της εταιρίας Rank Taylor Hobson Limited. Επελέγη cut – off μήκος στα 0,8 mm ενώ οι αναγκαίες μετρήσεις εκτελέσθηκαν χρησιμοποιώντας ένα στυλίσκο αναγνώσεως χωρίς πέδιλο και χωρίς συγκεκριμένη διεύθυνση μέτρησης. Σε κάθε ένα από τα 12 δοκίμια μετρήσαμε 17 παραμέτρους τραχύτητας και κυμάτωσης (9 παραμέτρους τραχύτητας τις  $R_a, R_t, R_{zDIN}, R_P, R_{Sm}, R_{SK}, R_{ku}, R_{delQ}, R_v$  και 8 παραμέτρους κυμάτωσης τις:  $W_a, W_t, W_{zDIN}, W_P, W_{Sm}, W_{SK}, W_{ku}, W_{delQ}$ )

Για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 50 μετρήσεις, σε κάθε μια από τις οποίες κατεγράφησαν οι τιμές και των 17 αναφερθεισών παραμέτρων. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν και στα 12 δοκίμια, ήτοι συνολικά έγιναν  $50 \times 17 \times 12 = 10.200$  μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές μπήκαν σε ένα αρχείο του EXCEL, το αρχείο Hlekt~1.xls και είναι ομαδοποιημένες σε 12 υποπίνακες, έναν για κάθε διαφορετικό δοκίμιο (δηλαδή για κάθε συνδυασμό  $I \times T$ ). Προχωρήσαμε σε 50 μετρήσεις ανά δοκίμιο για να έχουμε όσο το δυνατόν στατιστικώς ανεπηρέαστα δείγματα. Κάθε υποπίνακας έχει τίτλο τον αντίστοιχο συνδυασμό  $I \times T$ , έτσι π.χ. ο πίνακας I5T300 περιέχει τις μετρήσεις των 17 παραμέτρων, που πραγματοποιήθηκαν στο EDM δοκίμιο κατεργασμένο με  $I = 5A$  και  $T = 300 \mu\text{sec}$ .

Οι δώδεκα αυτοί πίνακες ακολουθούν στις επόμενες σελίδες.

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>y</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
1	4,78	27,8	23,7	14,6	165	0,345	2,41	18,1	5,78	2,59	13,2	6,89	8,2	1235	0,3	2,18	0,964
2	4,16	28,4	22,1	15,2	121	0,113	3,12	18,5	5,29	2,59	15,3	6,46	11,4	1191	1,2	4,32	0,979
3	4,22	36,9	23,9	21,5	127	0,41	4,17	17	5,47	4,35	25,5	10,9	12,2	1285	-0,756	3	1,63
4	3,41	27	19,9	14,3	137	-0,011	3,38	15,9	4,33	3,79	3,48	10,95	12,09	1129	0,315	1,92	0,476
5	4,25	36,6	23,7	19,1	154	0,084	4,31	15,8	5,62	3,19	11,9	6,37	7,09	1516	0,7	1,99	1,01
6	5,14	31,4	25,9	16,6	137	0,138	2,6	18,2	6,36	4,56	17,6	8,48	10,2	2355	0,36	1,75	1,05
7	5,35	43,3	30,3	21,3	130	0,018	3,55	21,5	6,77	2,68	9,57	6,34	5,11	2837	0,007	1,52	0,84
8	4,59	28,6	21,9	16,4	148	0,49	2,79	17,6	5,68	3,32	14,7	6,56	7,74	2661	0,045	2	0,867
9	4,22	25,1	20,5	13,5	158	-0,017	2,36	17,3	5,09	3,06	11,6	5,75	5,47	2417	-0,124	1,72	0,73
10	3,49	25,1	20,8	10	157	-0,55	3,24	14,3	4,45	2,89	11	5,41	5,91	2254	0,165	1,76	0,762
11	3,9	28,4	23,2	15,1	124	0,267	3,42	17,7	5,13	3,75	14,3	6,6	8,49	2538	0,435	1,92	0,828
12	3,73	29	22,3	14,9	111	0,085	3,19	16,1	4,75	2,27	12,7	5,24	8,05	1214	1,12	3,76	0,965
13	4,55	33	24,4	18,6	140	0,114	2,99	18,2	5,62	5,08	20	8,98	10,8	2554	0,174	1,96	1,14
14	5,18	41,9	27,6	23,1	144	0,354	4,05	18,5	6,58	3,86	20,5	10,2	11,3	2926	0,483	2,73	1,21
15	4,53	27,2	23,3	12,7	152	-0,224	2,61	16,7	5,63	3,29	13,6	5,47	7,9	3083	0,672	2,29	0,932
16	4,08	23	21,4	10,7	152	-0,501	2,53	16,1	4,99	4,71	18,7	14,2	8,1	1362	-0,501	2,09	1,61
17	4,12	21,5	20,5	9,11	138	-0,434	2,4	15,7	4,96	2,97	11,2	7,22	6,68		0,572	2,06	1,1
18	5,2	33,5	29,5	19,4	133	0,314	3,14	19,6	6,58	1,75	6,9	5,09	3,11	1271	-0,457	1,96	0,786
19	4,54	25,9	24,7	14,3	161	0,33	2,58	17	5,58	1,79	7,05	5,34	3,36	846	-0,356	1,91	0,93
20	4,54	25,2	24,5	12,9	144	0,134	2,46	18,1	5,52	1,67	6,65	5,17	3,41	1158	-0,005	1,9	0,893
21	4,14	29,3	25,7	16,4	128	0,07	3,27	19,7	5,29	1,46	5,07	4,36	2,13	863	-0,377	1,71	0,778
22	3,37	25,3	19,4	13,6	90,5	0,475	3,54	17,7	4,36	1,47	5,24	3,21	3,07		0,502	1,88	0,67
23	4,42	28,4	23,1	14,7	134	0,138	3,05	20,5	5,47	1,93	7,59	6,61	3,93		0,56	1,89	0,79
24	3,82	24,2	22,2	13,3	130	0,36	3	16,8	4,87	3,58	11,3	9,64	5,3	1350	-0,336	1,52	1,16
25	3,48	23,2	21,4	14,2	105	0,639	3,46	17,1	4,49	3,71	11,6	10	6,09		0,078	1,42	1,17
26	3,93	26,5	23,8	15,1	120	0,591	3,47	17,2	4,99	2,41	9,59	7,92	3,39		-0,794	2,31	0,94
27	4,89	30,8	26,5	15	150	-0,14	2,92	17,2	6,15	5,94	23	20	11	1381	-0,06	1,9	1,96
28	2,88	20,1	16	9,74	90,5	-0,37	3,23	15,5	3,69	3,52	10	5,01	4,42		-0,142	1,37	0,929
29	4,07	29,2	26,7	17,4	157	0,955	4,22	17,7	5,45	0,986	3,89	3,22	2,17	832	0,231	1,77	0,793
30	4,82	25,8	23,6	13,4	160	-0,035	2,18	16,9	5,75	1,95	7,34	5,9	3,99	1040	0,242	1,79	0,934
31	4,85	30,3	24,9	17,5	113	0,488	2,88	20,2	6,05	3,16	9,82	4,9	5,06		0,114	1,36	1,07
32	4,37	29,5	26	16,2	103	-0,16	2,71	20,4	5,41	1,18	5,82	3,87	2,45	1051	0,092	2,19	0,828
33	3,11	19,8	16,1	9,35	135	0,095	2,4	15,5	3,73	3,13	11,4	5,68	5,6	1650	-0,085	1,73	0,985
34	4,48	24,9	22,4	11,6	150	-0,046	2,44	16,7	5,41	2,72	9,27	6,01	5,17		0,169	1,64	1,1



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delq</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>delq</sub>
35	4,52	23,8	21,8	10,4	139	-0,35	2,52	17,7	5,48	2,65	8,96	4,86	5,8		0,69	1,99	0,931
36	3,53	26,8	20,3	11,9	125	0,23	3,28	15,5	4,5	0,925	3,81	3,35	2,08	688	0,308	2,04	0,717
37	3,86	19,6	18,5	11,2	110	0,39	2,15	16,2	4,61	3,86	12,8	6,97	4,65	712	-0,638	1,89	1,34
38	4,64	22,8	21,1	10,8	169	-0,26	2,21	17	5,52	2,41	10,7	7,57	4,72	904	-0,493	2,33	1,13
39	4,08	24,1	21,2	10,9	120	-0,357	2,77	18,3	5,02	1,34	5,45	4,72	3,44	480	0,825	2,48	0,806
40	5,2	28,3	26,5	15,2	128	0,272	2,38	17	6,44	1,26	5,51	4,57	1,97	1145	-0,973	2,81	0,756
41	4,37	29	23,5	13,6	118	-0,207	3,28	19	5,53	2,35	10,5	7,9	6,29	1367	0,556	2,39	0,987
42	3,91	26,2	23,2	14,2	105	0,271	3,09	17	4,93	1,05	4,78	3,19	2,76	1322	0,586	2,49	0,703
43	3,7	25,9	23	13,4	133	0,393	3,08	17,6	4,71	2,02	7,73	3,87	3,49		-0,193	1,89	0,771
44	5,11	33	30,1	18,7	125	0,3	2,81	22	6,37	3,2	11,6	10,8	5,11	1098	-0,44	1,86	1,05
45	4,38	31,1	25,8	15	114	-0,162	3,23	19,3	5,58	0,875	4,84	3,46	3,12	639	0,384	2,83	0,632
46	4,46	26,9	23,6	11,2	132	-0,236	2,8	17,8	5,5	2,25	8,42	6,78	3,3	589	-0,323	1,98	1,09
47	3,15	21,7	21,1	15	95	0,27	2,89	16,3	5,27	1,72	8,17	5,42	3,05		-0,833	3,01	0,772
48	3,58	20,2	20	9,8	102	-0,21	2,67	18,3	4,58	2,2	9,99	7,59	6,56	741	0,773	2,84	0,998
49	4,19	26,2	22,3	11,8	181	-0,21	2,53	17,3	5,01	2,38	10,8	7,3	4,96	726	-0,517	2,33	1,19
50	4,95	28,6	23,9	10,9	166	-0,472	2,64	17	6,07	4,68	17,6	8,77	7,91	1616	-0,305	1,88	1,47
MEAN	4,245	27,606	23,156	14,296	133,220	0,084	2,968	17,606	5,328	2,730	10,761	6,821	5,792	1120,520	0,079	2,125	0,983



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DefIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DefIQ</sub>
1	5,95	37,7	30,9	19,2	220	0,157	2,62	17,1	7,28	2,27	11,6	5,03	6,02	1520	0,286	2,68	0,873
2	7,14	48,4	32,3	22,3	187	-0,197	2,86	18,4	8,85	3,89	17,6	8,19	8,03	2054	-0,142	2,18	1,33
3	7,46	40,7	32,7	23,6	212	0,128	2,31	18,9	8,86	2,7	14,6	8,96	5,4	867	-0,782	3,26	1,47
4	5,29	38,4	30,9	16,3	183	-0,37	2,76	17,1	7,44	3,64	18	8,9	6,03	708	-1,11	3,43	1,62
5	6,7	43,1	32,4	25	184	0,393	2,69	17,9	8,12	5,84	23,3	10,8	13,4	1610	0,566	2,14	1,44
6	6,85	54,4	37,6	23,5	180	-0,456	3,53	19,3	8,65	4,63	23,1	10,3	10,7	2202	-0,241	2,54	1,3
7	5,76	39,9	31,9	20,7	189	0,0845	3,06	16,6	7,4	3,1	11,1	8,48	5,61	1282	-0,017	1,59	1,2
8	6,16	33,4	29,5	14,4	199	-0,18	2,38	16,8	7,49	2,15	9,92	4,44	4,89	973	-0,296	2,27	0,905
9	6,04	34	30,7	16	233	-0,39	2,54	16	7,49	3,11	11,8	7,19	6,77	670	0,347	1,77	1,32
10	6,11	35,1	27,8	18,4	242	-0,13	2,27	15,6	7,29	2,84	14,2	9,05	7,4	943	-0,033	2,31	1,58
11	6,01	33,5	26,7	12,3	216	-0,59	2,59	16,5	7,15	3,1	14,7	6,79	9,43	1232	0,799	2,9	1,25
12	5,72	28,8	25,8	14,7	197	-0,04	2,2	16,1	6,79	1,64	8,86	5,4	3,92	783	-0,506	2,68	1,02
13	5,21	33,1	28	14,3	227	-0,308	3,03	15,7	6,51	1,79	9,82	5,85	3,65	672	-0,68	3,2	1,09
14	5,51	31,2	26,7	15,9	167	-0,04	2,47	17,9	6,69	5,26	27,6	12,6	14,5		0,432	2,66	1,55
15	5,64	34,9	28,9	15,6	200	-0,507	2,79	16,7	7,13	2,5	14	9,02	5,34	1371	-0,886	3,44	1,26
16	5,74	35,9	30	16,6	182	-0,235	2,84	17	7,23	2,38	9,4	5,26	4,37	1452	-0,352	1,99	1,02
17	7,42	31,1	29,6	14	232	-0,256	1,91	18,8	8,51	3,12	13,5	10,8	6,9	582	-0,176	2,18	1,44
18	6,13	27	25,6	13,5	182	0,134	1,92	16,7	7,12	3,12	10	5,18	6,14		0,506	1,7	0,972
19	6,4	32,6	28,6	12,9	196	-0,477	2,4	18,7	7,62	1,66	8,59	6,48	5,39	652	0,526	2,94	1,11
20	5,68	28,5	25,7	13,6	211	0,025	2,08	17,3	6,71	1,15	5,66	3,12	2,69	496	-0,715	2,5	0,779
21	4,71	25,3	23,9	11,1	199	-0,342	2,52	14,5	5,77	3,1	9,86	5,82	6,04		0,581	1,72	1,06
22	6,67	43	31,7	20,3	193	-0,257	3,03	18,9	8,39	3,45	14,3	10,9	7,02	805	-0,034	2,06	1,47
23	8,21	41,2	35,2	18,6	254	-0,147	2,22	18,8	9,62	1,9	8,45	6,38	2,78	682	-1,05	3,09	1,17
24	6,13	28,8	26,6	13,6	182	-0,214	2,03	19,9	7,23	2,93	10,8	5,64	5,93		0,268	1,84	1,04
25	6,03	35,2	31,4	16,2	147	-0,186	2,53	17,7	7,63	0,927	7,41	3,99	2,03	314	-1,53	5,53	1,02
26	5,43	33,1	27,4	14,6	173	-0,233	2,86	16,7	6,68	3,82	13,6	6,8	7,91		0,322	1,81	1,12
27	5,95	35	30,8	14,5	181	-0,337	2,84	18,3	7,51	4,29	14,7	13,3	6,33	1245	-0,34	1,66	1,52
28	4,98	24,6	23,4	11,5	176	-0,063	2,11	15,5	6,01	4,31	17,1	12,6	5,88		-0,854	2,55	1,4
29	6,24	29,3	29	14,2	194	-0,016	2,11	17,9	7,45	5,96	17,1	16,7	8,3	1169	-0,068	1,37	1,53
30	5,7	32,4	28,4	14,1	127	-0,162	2,7	17	7,17	2,22	7,56	6,8	4,44	1033	0,298	1,59	1,15
31	6,12	27,2	24,8	15,6	203	0,276	1,99	16,6	6,98	1,95	8,35	7,17	5,01	828	0,7	2,43	1,11
32	5,57	30,7	27,2	15,9	117	0,134	2,47	19	6,87	1,82	7,9	6,01	3,35	876	-0,546	2,29	1,14
33	6,2	32,3	30,3	13,8	206	-0,375	2,59	18,4	7,61	2,02	9,53	7,23	5,14	801	0,06	2,4	1,23
34	7,39	39,3	35,2	18,6	231	-0,39	2,39	18,7	8,89	2,67	9,87	5,07	5,43		0,06	1,73	1,08

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zoin</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>oio</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zoin</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>oio</sub>
35	7,17	42,2	34,9	19,7	162	-0,163	2,74	21,4	8,82	4,1	15,3	12,4	6,62	1021	-0,374	1,91	1,64
36	8,1	30,6	29,5	14,9	277	-0,024	1,6	17,7	9,02	3,11	13,6	8,87	6,45		0,008	1,99	1,33
37	5,67	32,3	28	14,9	145	0,016	2,46	17,9	6,79	4	16,3	8,67	8,51		0,265	2,08	1,32
38	5,74	33,5	31,4	15,9	177	-0,338	2,65	18,8	7,27	2,04	8,4	6,61	4,78	749	0,2	1,83	1,13
39	5,07	30,4	27	12	167	-0,274	2,76	16,5	6,31	2,72	12,4	6,34	5,25		-0,58	2,54	0,972
40	6,84	41	35,1	18,2	168	-0,117	2,62	19	8,37	4,32	17,2	13,4	9,65		0,454	2,08	1,57
41	5,45	34,7	27	19	127	0,085	2,94	17,5	6,92	1,5	6,88	5,59	2,9	482	-0,488	2,43	0,933
42	5,77	36,4	28,7	19,5	214	0,232	3,12	17,2	7,31	2,38	13,5	11,2	6,33	1096	-0,81	3,14	1,32
43	4,82	26,5	24,1	13	185	0,126	2,22	17,4	5,8	2,16	7,59	7,12	3,68	937	-0,008	1,65	1,19
44	5,6	32	30,5	14,9	140	-0,129	2,56	17,9	7,1	3,09	12,7	9,17	3,25		-1,38	3,56	1,1
45	6,92	41,1	32,6	18,7	229	-0,583	2,91	17,4	8,66	3,85	13,8	9,19	6,55		-0,06	1,55	1,31
46	5,87	35,5	29,2	17,6	155	-0,01	2,74	17,3	7,41	2,31	11,3	8,73	5,04	579	0,058	2,04	1,31
47	7,44	41,3	34,7	24,6	169	0,401	2,77	20,1	9,14	3,98	16,8	12,5	8,29	724	0,086	2,09	2,04
48	4,75	35,9	28,2	15,7	174	-0,45	3,8	15,6	6,47	2,04	8,8	7,64	3,46	1456	-0,746	2,5	0,957
49	6,2	35,7	31,4	19,6	218	0,374	2,61	18,4	7,51	2,59	11,3	8,48	5,67	1276	0,025	2,16	1,24
50	6,54	39,7	32,8	22,1	183	0,225	2,71	17,6	8,04	2,87	13,5	9,58	6,84	720	0,077	2,42	1,49
MEAN	6,124	34,958	29,654	16,714	190,240	-0,124	2,577	17,614	7,502	2,966	12,665	8,235	6,109	737,240	-0,158	2,368	1,248

Hlekt~1



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>2DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>2DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
1	2,66	16,8	14	7,18	130	-0,112	2,67	11,9	3,34	4,9	20,6	11,4	9,23	2035	-0,53	2,16	1,29
2	6,38	46,5	32	24,1	248	-0,08	3,18	15,7	8,16	5,22	19,9	13,7	10,2	1111	0,287	1,77	1,74
3	4,89	31,3	23,7	14,4	204	-0,33	2,74	13,6	6	5,39	24	13,9	10,1	1446	-0,3	2,32	1,52
4	1,11	7,17	6,02	3,06	131	-0,36	2,83	6,65	1,38	0,863	3,44	1,88	1,33	2364	-0,454	1,99	0,44
5	5,1	33,7	23,9	14,7	180	0,03	2,69	14,8	6,33	4,35	24,2	11,5	10,4	799	-0,48	3,03	1,41
6	1,77	10,1	7,82	4,4	260	-0,506	2,75	6,11	2,15	1,69	6,46	3,83	3,18	692	-0,15	1,73	0,67
7	3,02	18,2	14,7	8,03	236	-0,067	2,59	9,55	3,73	1,09	5,66	3,34	2,83	1073	0,23	2,49	0,65
8	5,66	35,7	29,7	17,1	253	-0,057	2,64	14,6	7,02	5,83	20,3	12,1	11,3	1156	0,004	1,65	1,63
9	5,62	37,9	31,1	15,7	191	-0,45	3,32	14,6	7,31	3,68	14,9	10,1	6,12	1461	-0,55	2,05	1,4
10	5,04	29,4	24,2	11,6	185	-0,516	2,63	14,4	6,25	1,97	8,05	5,51	3,38	2204	-0,196	1,99	0,876
11	5,4	40,8	29,7	23	226	0,367	3,86	15,1	7,15	2,97	11,9	9,5	4,44	902	-0,52	2,04	1,31
12	5,37	29,1	27	11	245	-0,67	2,84	14,6	6,58	3,5	17,5	7,77	7,44		-0,22	2,48	1,06
13	6,04	35,3	27,9	18	213	0,085	2,56	16,3	7,44	3,45	14,3	10,9	8,07	886	0,142	1,94	1,54
14	6,28	33,3	28,3	14,8	213	-0,233	2,28	16	7,44	4,78	25,1	11,7	13,3	722	0,51	2,75	1,71
15	5,29	30,7	25,4	13,8	221	-0,27	2,47	14,1	6,42	6,15	18,2	9,71	10,5		0,54	1,55	1,3
16	7,77	41,9	36	20,4	225	-0,032	2,31	19,7	3,3	5,31	25,7	15,3	11,9	1374	-0,095	2,41	1,87
17	2,69	16,9	13,8	9,33	135	0,315	3,17	10,1	3,5	2,62	9,52	5,92	3,22	1396	-0,923	2,35	1,04
18	7,12	37,1	31,1	19,9	318	0,154	2,24	15	8,31	4,47	17,2	14	10,7	879	0,74	2,26	2,17
19	7,72	42,3	35,8	18,6	230	-0,188	2,37	16,7	9,22	1,47	6,68	5,53	3,88	820	0,506	2,33	1,12
20	7,33	35,2	33,3	15,5	176	-0,427	2,22	18,1	8,74	3,32	14	10,3	6,35	645	-0,387	2,18	1,69
21	7,01	40,1	37,1	20,1	290	0,055	2,55	17,8	8,71	3,91	16,8	11,1	8,84		0,163	2,08	1,37
22	5,9	31,9	28,2	13,3	297	-0,316	2,46	14,7	7,46	4,77	17,9	13,5	9,31	826	0,083	1,8	1,9
23	6,74	34,4	30,5	16,8	206	-0,177	2,15	16,6	7,99	3,33	15,1	10,5	6,98	725	-0,07	2,36	1,64
24	5,95	30,3	24,8	11,1	208	-0,584	2,48	16,6	7,17	5,32	16,8	14,2	6,28		-0,594	1,74	1,54
25	5,14	28	25,9	13,8	156	0,207	2,48	14,6	6,35	4,59	15,1	9,89	7,23	882	-0,127	1,52	1,47
26	4,8	32,7	26,6	17	200	-0,332	3,55	14,1	6,23	2,1	10,4	7,59	5,97	810	-0,191	2,06	1,31
27	4,3	29	23,2	10,8	211	-0,352	3,31	13,9	5,47	1,87	7,92	5,14	2,76	804	-0,967	2,75	1,12
28	4,97	24,5	23,4	11,5	217	-0,169	2,24	14,4	5,98	2,16	9,25	6,82	5,1	1142	0,301	2,22	0,996
29	7,52	43,2	33,6	19,1	210	-0,247	2,52	15,8	9,14	2,62	11,7	9,72	7,23	729	0,256	2,09	1,3
30	6,69	33,6	29,3	16,2	229	-0,07	2,21	17	7,96	5	16,2	8,35	8,86		0,175	1,52	1,26
31	5,88	50,2	39	23,7	171	-0,357	4,57	16,9	8,36	1,42	6,61	4,88	1,96	970	-1,02	3,26	0,896
32	5,09	29,9	26,5	12,6	198	-0,138	2,51	16,1	6,25	2,67	10,5	9,19	4,7	962	-0,134	1,66	1,49
33	5,79	29,3	27,8	10,9	257	-0,428	2,24	16,5	6,82	3,21	13,9	12,6	7,54	1224	-0,102	1,99	1,19
34	6,61	34,1	31,7	16,9	192	-0,121	2,29	17,5	7,96	4,09	11,6	10	5,49	908	-0,184	1,35	1,26

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>2DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delq</sub>	R <sub>u</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>2DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>delq</sub>
35	7,69	47,6	41,6	17,5	174	-0,51	3,05	18,7	9,57	5,35	18	16	8,39	1261	0,005	1,56	2,05
36	4,64	23,4	19,7	10,6	224	-0,317	2,21	12,1	5,45	2,8	10,8	8,48	4,2	929	-0,44	2,11	1,45
37	5,66	40,1	35,5	14,6	222	-0,578	3,93	15,5	7,48	1,51	7,16	5,45	2,99	477	-0,52	2,63	1,02
38	4,83	27,8	24,6	10,6	168	-0,248	2,5	15,5	5,97	1,36	6,42	4,89	2,38	681	-0,674	2,84	0,88
39	5,57	34,6	29,7	14,9	165	-0,635	3,02	16,3	6,99	2,83	12,5	7,5	6,94	957	0,499	2,36	1,32
40	5,43	34,5	25,6	12,9	165	-0,687	3,58	15,7	7,06	4,45	17	14	8,81	1157	-0,014	1,89	1,55
41	6,67	37	35,2	14,3	214	-0,455	3,78	17,4	8,14	4,33	16,2	11,1	7,2		-0,333	1,92	1,33
42	4,61	29,2	26,1	11,1	179	-0,48	3,01	15,2	5,74	1,94	10,6	6,36	5,35	843	-0,11	2,91	1,04
43	4,47	29,5	21,2	14,9	188	-0,095	2,98	14	5,74	1,59	7,46	5,65	4,57	590	0,198	2,18	0,899
44	5,28	34	28,7	17,4	144	-0,015	2,72	18	6,61	2,58	8,86	8,6	2,95		-0,878	2,25	1,07
45	4,86	31,6	26,8	14,8	184	0,223	3,13	15,3	6,36	2,91	13,2	9,68	5,8	1124	-0,303	2,41	1,33
46	5,28	26,7	25,5	14,4	196	0,192	2,38	14,6	6,48	5,33	21,5	17,4	10,9	1118	0,108	2,01	1,96
47	5,38	29,1	28,5	12,2	305	-0,426	2,54	14,3	6,4	3,23	11,4	9,09	7,01	1224	0,537	1,96	1,29
48	5,76	27,8	27,1	9,61	214	-0,74	2,64	15,8	7,01	5,17	20,3	18,1	8,33	962	-0,553	2,15	2,12
49	5,26	34	28,1	15,6	242	-0,111	3,1	15,4	6,59	3,48	13,3	13,1	3,95	1031	-1,06	2,73	1,4
50	5,91	30	26	11,3	248	-0,325	2,18	15,3	6,9	2,8	11,9	6,36	6,45		0,186	2,13	1,14
MEAN	5,439	31,949	27,059	14,302	209,880	-0,232	2,773	14,984	6,602	3,435	13,880	9,663	6,647	886,020	-0,152	2,158	1,341



a/a	R <sub>e</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>sDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>oilo</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>sDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DelQ</sub>
1	5,22	31,7	26,6	16,4	210	-0,044	2,43	17	6,33	9,54	44,6	25	23,9	1403	0,32	2,31	2,74
2	6,7	42,7	32,6	25,5	188	0,275	2,78	20,5	8,12	2,64	16,7	9,32	7,77	977	-0,18	3,28	1,14
3	4,92	34	28,5	19,3	167	0,203	2,71	17,1	6,17	4,5	23,7	9,48	10,7	1337	-0,278	2,75	1,4
4	5,57	39	28,5	23,1	180	0,245	3,14	17,3	7,07	2,75	14,9	6,47	9,04	864	0,696	3,21	1,23
5	6,2	39,2	32,2	19,6	186	0,195	2,67	21,3	7,54	2,44	11,6	7,47	7,26	730	0,692	2,67	1,11
6	5,67	35,2	28,4	19	147	0,218	2,57	18	7,06	3,58	14,1	7,8	6,38	1647	-0,3	1,86	1,18
7	4,14	31,4	25,4	20,2	136	0,567	3,61	16,9	5,37	2	8,03	5,48	3,99	1879	-0,056	1,79	0,808
8	6,12	33,1	28,1	18,3	197	0,173	2,38	17,2	7,39	1,82	9,69	6,39	3,36	730	-1,1	3,44	1,1
9	5,42	36,3	27,5	20	163	0,355	2,65	18,6	6,68	4,11	19,7	9,37	8,96	1215	-0,08	2,42	1,27
10	5,85	35,2	27	17,5	179	0,25	2,36	18,6	6,98	2,47	13,8	7,61	8,59	1476	0,913	3,41	1,14
11	6,18	36,5	31,5	19,3	179	0,152	2,39	17,4	7,62	3,32	16,1	9,58	8,5	695	-0,0137	2,42	1,37
12	5,72	38,6	31,6	17,4	174	0,045	2,88	18,6	7,4	4,17	23,7	11,9	9,76	1513	-0,57	3,27	1,57
13	4,63	36,9	25,9	21,2	155	0,306	3,55	17,6	5,84	6,62	29,3	13	10,2		-0,445	2,04	1,43
14	4,99	31,2	26,4	15	174	-0,17	2,59	18	6,19	6	24,3	13,2	11,8	1174	-0,268	2,02	1,6
15	5,25	37,5	28,3	22,3	214	0,385	2,89	17,1	6,35	3,8	17,7	9,1	6,67	1560	-0,73	2,74	1,1
16	6,09	38,3	32	20,4	166	0,156	2,85	22,2	7,62	2,95	11,6	8,06	8,17	1527	1,16	3	1,11
17	5,78	38,1	30,9	26	154	0,961	4,21	21	7,31	3,85	14,6	12,4	9,15		0,739	2,22	1,37
18	8,05	48,7	41,4	29,6	208	0,406	2,94	22,4	10,1	3,53	14,1	11,2	4,92	612	-0,686	2,36	1,85
19	4,56	40,4	27,2	18,4	115	-0,345	4,48	18	6,25	2,31	10	7,32	6,32	605	0,782	2,63	1,04
20	5,05	32,5	26,6	12,8	154	-0,514	3,2	17,8	6,46	2,04	7,77	6,36	3,34	781	-0,242	1,92	0,939
21	5,83	34,9	30,9	20,6	138	0,575	2,8	21,3	7,23	2	7,11	6,17	3,17	1062	-0,237	1,68	1,1
22	5,59	39,5	32,8	25,6	229	0,907	3,96	19,3	7,23	1,78	9,24	5,9	3,91	660	-0,723	3,01	1,22
23	6,25	42,1	34,3	26,2	194	0,67	3,54	20,4	7,75	4,09	15,1	11,7	9,94	1189	0,834	2,32	1,34
24	4,96	32,6	28,1	18,1	178	0,034	2,82	17,5	6,18	1,73	6,52	5,59	2,74	581	-0,303	1,82	1,02
25	5,92	36,2	31,1	18,4	181	0,154	2,53	19,7	7,26	6,79	22,2	16,7	10,2	957	-0,189	1,57	1,81
26	4,65	27,7	22	16,1	149	0,408	2,75	19,4	5,69	3,3	10,8	5,41	6,05		0,276	1,59	0,969
27	5,01	32,2	27	15,2	113	-0,018	2,58	18,3	6,38	1,76	9,52	7,42	5,6	1073	0,539	2,88	1,07
28	3,87	31,9	25,7	16,4	121	0,0537	3,51	18,1	4,93	3,1	16,7	11,5	10,2	809	0,14	2,78	1,38
29	6,52	42	33,9	25,3	212	0,912	3,86	20	8,41	3,29	11,8	9,94	7,97	1299	0,695	1,98	1,23
30	4,66	32	26,4	14,6	161	-0,578	3,37	15,7	6,04	3,49	14,6	10,4	7,45	644	0,204	2,09	1,4
31	5,32	39,5	34,2	27,9	150	1,41	5,29	21,6	7,13	3,48	13,5	12,2	4,69		-0,91	2,46	1,43
32	6,03	42	31,3	25,6	152	0,438	3,53	19,8	7,72	1,59	7,1	4,62	4,63	1126	0,976	2,87	0,91
33	6,09	39,2	31,9	24,9	197	0,626	3,47	19,8	7,63	2,02	9,27	6,95	5,39	1094	0,109	2,05	0,908
34	6,31	43,1	34,1	26,7	187	0,78	3,67	19,8	8,11	1,57	6,37	5,32	3,09		-0,249	2,03	0,812



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>gm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>e</sub>	W <sub>e</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>gm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
35	6,59	38,7	33,7	20	175	0,051	2,72	20,1	8,14	4,7	15,6	12,2	6,55		-0,197	1,55	1,27
36	4,09	29,3	23,5	13,2	169	-0,45	3,04	19,4	5,15	3,02	12,5	9,52	6,64	1251	0,151	2,08	1,2
37	5,19	30,4	27	18,6	166	0,723	3,01	18,7	6,45	1,89	7,16	6,64	2,93	743	-0,501	2,02	0,997
38	5,43	41,5	33,7	24,5	195	0,671	4,12	18,8	7	5,28	16,6	16,4	10,4		0,624	1,78	1,67
39	7,68	44,1	39,7	24,8	244	0,513	2,81	19,2	9,47	2,72	9,41	8,64	4,29	654	-0,205	1,64	1,47
40	5,46	34	27,5	16,9	143	-0,208	2,58	18,2	6,8	3,91	19,7	11,9	11,3	742	-0,024	2,36	1,99
41	5,36	35,7	32,1	20,3	171	0,507	3,32	18,6	6,97	3,39	12,3	10,9	6,76		0,38	1,85	1,09
42	7,79	41,8	37,1	25	223	0,146	2,32	19,4	9,4	3,39	17,8	11,3	4,76	620	-1,43	4,28	1,53
43	4,87	30,5	26,4	16,4	142	0,399	3,11	20,5	6,28	1,98	8,29	4,8	4,39	1519	-0,275	1,89	0,899
44	4,87	27,3	25,2	16,2	145	0,438	2,65	19,1	6	2,5	12,3	8,46	7,02	767	-0,05	2,16	1,11
45	6,85	38	37,2	19	225	-0,06	2,57	21,6	8,54	2,67	10,8	7,4	7,07	981	0,846	2,53	1,31
46	5,34	26,7	24,5	14,3	178	0,23	2,15	17	6,3	1,64	6,62	5,78	3,48	682	1,15	1,92	0,938
47	5,54	30,6	27,1	16,8	194	0,295	2,48	19,8	6,64	5,46	20,5	17,8	6,82	946	-0,953	2,47	2,17
48	4,15	32,1	26	18,9	128	0,548	4,18	16,9	5,52	1,16	5,4	4,52	1,53		-1,39	3,69	0,715
49	4,22	29,2	26,9	17,3	148	0,214	2,84	17,2	5,34	2,67	10,9	8,5	5,92		0,362	2,11	1,1
50	5,79	45,2	33,9	26,9	151	0,507	3,97	21,2	7,41	2,4	10,1	7,3	4,48	702	-0,429	2,22	1,23
MEAN	5,567	36,130	29,836	20,240	172,100	0,294	3,097	18,980	6,979	3,264	14,036	9,368	6,963	816,520	-0,009	2,389	1,276

a/a	R <sub>s</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>st</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>st</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>delQ</sub>
1	8,35	45,3	39,6	24,4	281	0,396	2,39	18,8	10	5,89	27,9	15,4	11,7	1230	-0,49	2,47	2,11
2	6,34	54	36,7	29,5	220	0,45	4,46	17,4	8,24	4,55	21,6	11,7	13,2	781	0,747	2,85	1,86
3	5,79	45,9	31,4	25,7	168	0,34	3,64	16,9	7,62	4,68	24	12,5	14,8	1259	0,906	3,21	1,74
4	7,62	42,3	33,8	23,1	201	0,226	2,26	19,8	9,09	4,88	21,7	10,3	11,2	1372	0,263	2,22	1,36
5	6,75	46,7	34,1	29,7	256	0,39	3,34	17,2	8,42	5,11	29,3	14,3	14,6	673	-0,29	2,82	2,05
6	8,11	63,3	40,4	32,4	289	0,44	3,38	18,6	10	2,88	20,3	10,8	13,3	1007	0,053	3,57	1,67
7	8,3	43,2	37,7	25	293	0,21	2,32	17,9	9,94	5,15	27,3	16,1	11,6	834	-0,4	2,91	2,29
8	8,69	46	37,2	24,6	236	0,257	2,28	17,4	10,5	7,02	34,6	20,5	19,5	1584	0,292	2,48	2,59
9	7,14	49,9	33,9	29	269	0,537	3,49	16,2	8,88	3,66	14,9	11,7	8,97	852	0,568	2,15	1,6
10	8,66	54,8	38,4	34,3	262	0,33	2,95	19,9	10,5	7,74	36,7	15,4	14,7	1983	-0,46	2,59	2,71
11	8,01	49,7	40,1	25,7	195	0,194	2,56	20	9,82	6,87	32,7	17,9	14,4	1048	-0,34	2,25	2,01
12	9,42	60,1	49,3	28,6	219	-0,133	2,97	20,8	12	7,75	37,3	18,9	18,3	1000	0,053	2,33	2,53
13	8,51	51,7	38,6	28,7	259	0,367	2,76	18,3	10,3	7,32	33,8	13,8	17,5	1134	0,118	2,32	2,26
14	5,89	47,4	34,1	28	181	0,932	4,38	18,4	7,76	5,43	29,7	15	17,5	1968	1,16	3,44	1,91
15	7,34	44,9	35,9	25,6	210	0,145	2,71	19,3	8,98	5,36	23,8	17,1	15,6	1028	0,866	2,78	2,02
16	9,46	62,3	46	33,4	235	0,7	3,3	23,9	12,2	5,56	18,6	9,78	10,7		0,306	1,61	1,75
17	8,4	40,7	37,4	23,9	243	0,486	2,31	18,1	9,97	4,32	14,7	7,99	9,06		0,426	1,68	1,64
18	8,79	39,2	33	23,8	306	0,466	2,26	18,5	10,2	5,06	21,3	13,1	9,49	878	-0,334	2,18	1,8
19	6,47	41,9	33,9	28,3	272	1,09	4,31	17,3	8,52	3,44	21,9	14,8	16	754	1,45	5,03	2,1
20	7,7	38	34,3	22,1	249	0,368	2,24	18	9,26	7,6	32,2	26	15,3	396	-0,281	2,17	2,56
21	7,28	43,1	36,9	28,6	189	0,657	3,36	19,9	8,93	2,15	8,37	7,51	3,97	770	-0,05	1,67	1,35
22	8,71	51,4	45,3	25,4	187	0,327	2,71	23,5	10,7	3,46	12,9	9,21	5,08	754	-0,627	2,05	1,91
23	8,5	49,7	43,1	31,3	200	0,807	3,26	20,6	10,8	3,15	11,8	11,3	6,5	447	0,078	1,76	1,95
24	8,51	39,3	37,5	19,6	262	0,005	2,09	18,4	10,1	7,95	28,4	21,5	14,2		-0,178	1,73	2,64
25	9,1	54,6	46,9	35,2	257	0,816	3,44	19,3	11,7	5,73	25	16,2	15,2	582	0,399	2,08	2,36
26	6,77	40,1	33,2	18,5	159	-0,08	2,68	19,2	8,51	3,56	11,7	8,41	5,41		-0,075	1,46	1,07
27	9,79	53,5	42,2	34,3	267	0,71	3,12	20,8	11,8	2,91	14,8	10,7	6,09	799	0,116	2,16	1,95
28	7,26	38,6	32,5	19	262	-0,003	2,43	17,9	8,75	7,23	26,6	22,3	15,7	859	0,312	1,9	2,99
29	9	47	41,9	20,5	248	-0,251	2,16	20,2	10,6	4,87	19,2	11,4	9,66	612	0,05	1,9	2,18
30	6,87	34,3	29,2	16,4	245	0,382	2,09	16,9	7,96	1,55	12,4	5,16	4,32	617	-1,05	5,53	1,38
31	6,02	37	32,7	16,1	230	-0,267	2,48	19,8	7,33	4,67	18,9	15,6	11,2	786	0,268	1,87	2,35
32	9,15	44,7	41,4	25,8	179	0,429	2,34	22	11,2	4,46	22,5	14,6	12,5	806	0,587	2,81	2,24
33	6,58	41,9	35,4	24,5	220	0,865	3,58	17,7	8,38	3,47	17,7	9,56	9,04		-0,061	2,72	1,43
34	8,16	39,1	36,1	22,3	183	0,411	2,17	20,3	9,6	4,37	17,1	13,9	9,59	1475	0,453	2,02	1,57

a/a	R <sub>s</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>em</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>Deiq</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>em</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>Deiq</sub>
35	9,48	49	42,8	23	231	-0,114	2,27	20,6	11,9	2,27	11,1	9,07	5,59	449	-0,173	2,19	1,88
36	9,27	55,6	41,2	35	224	0,82	3,71	20,9	12,1	3,98	17,6	13,5	9,58	1135	0,101	2,25	1,89
37	8,76	45,5	40,8	26,2	310	0,457	2,22	20,3	10,2	5,58	21	16,4	9,55	1551	-0,303	1,85	1,97
38	7,91	52,9	47,2	36,2	208	1,19	4,78	20,6	10,7	1,64	7,81	5,65	5	551	0,574	2,43	1,36
39	6,37	45	36,9	24,7	229	0,377	3,63	17,9	8,02	6,7	21,7	10,8	13,4		0,536	1,73	1,88
40	7,97	41,9	36,8	23,8	201	0,323	2,36	18,3	9,54	2,59	12	9,65	6,7	683	0,331	2,45	1,5
41	8,89	52,5	39,6	31,2	219	0,588	3,23	20,7	11,6	4,02	23,1	15,1	12	895	0,726	2,99	2,56
42	8,86	43	39,3	27,1	286	0,724	2,46	21,4	10,7	3,72	16,6	11,8	8,09	793	-0,141	2,25	2
43	6,58	43,8	35,2	23,8	188	0,282	3,06	18,8	8,47	4,01	19,3	9,66	6,86		-0,742	3,01	1,39
44	6,64	36,8	32,4	22,5	186	0,836	3,03	19,1	8,3	4,8	19,5	14,2	10,6	1309	0,138	2,07	1,73
45	7,63	51,7	40,5	32,6	223	1,1	4,55	20,6	9,88	5,27	19,5	15,7	10	1273	-0,075	1,74	1,97
46	5,24	32,1	26,8	20,6	173	0,713	3,11	15	6,59	6,82	23,9	20,5	12,8		0,333	1,7	2,38
47	9,75	49,5	47,2	27,5	321	0,249	2,29	18,4	11,4	3,01	13,6	10,7	6,11	492	-0,136	2,26	1,73
48	8,04	40	36,7	21,9	215	0,152	2,17	17	9,65	5,87	23,1	17,3	9,84		-0,547	2,08	2,32
49	7,18	50,2	40,6	32,2	182	0,946	4,52	19,2	9,69	3,12	12,3	11,3	5,91	917	-0,286	1,93	1,53
50	8,48	57,4	44,4	29	240	0,075	3,38	18,8	11,1	2,33	11,7	7,84	7,67	750	1,15	3,54	1,61
MEAN	7,890	46,570	38,170	26,412	231,360	0,434	2,980	19,136	9,768	4,711	20,910	13,392	10,912	781,720	0,126	2,424	1,953



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
1	11,6	53,5	48,2	32,8	319	0,528	2,28	31,9	13,4	7,72	27,3	22,5	16,1	814	0,333	1,79	3,56
2	9,24	56,8	44,2	35,3	275	0,682	3,34	29,2	11,9	10	37,5	30,3	15,5	1278	-0,516	2	3,57
3	7,79	35,6	30,1	20,2	202	0,332	2,15	28,6	9,26	8,62	30,8	20,6	18	1438	0,435	1,84	3,29
4	10,4	55,7	51,2	25,8	247	-0,114	2,53	31,5	12,9	4,69	18,3	14,1	8,51		-0,104	1,8	1,9
5	10,3	42	39	23	268	0,023	1,78	30,8	11,7	7,3	27,9	23,7	14,5	1137	0,34	1,9	2,78
6	11,1	56,6	49,2	30,8	343	0,215	2,36	31,3	13,2	4,18	26,2	15,6	7,79	620	-1,08	4,37	2,7
7	6,46	31,2	31,1	18,9	208	0,59	2,5	27,8	7,74	3,88	14,6	13,4	6,06	948	-0,37	1,91	2,04
8	8,24	41,5	37,3	24,8	261	0,346	2,42	29,1	10,2	6,35	27,1	16,1	11,2	786	-0,6	2,35	2,56
9	12	74	52,9	38,7	224	0,317	3,13	33	15,7	6,5	24,4	22,4	9,16		-0,48	1,81	2,69
10	8,06	51,8	48,8	28,1	220	0,092	3,22	31,7	10,3	6,07	25,6	21,3	13,2		0,49	2,04	2,21
11	6,58	43,6	29,9	19,5	149	-0,11	2,92	29,7	8,12	5,83	24,8	11,7	13,8		0,716	2,23	2,48
12	7,55	43,4	39,5	26,3	195	0,2	2,71	29,9	9,16	7,14	26,8	16,5	10,1		-0,893	2,36	1,89
13	12,1	57,8	45,1	29,3	279	0,26	2,01	34,8	14,1	8,58	28,6	22,3	12,5	1439	-0,32	1,6	2,74
14	6,54	47	39,3	24,5	165	0,03	3,56	30	8,38	5,44	26,6	17,1	7,4		-1,39	3,81	2,13
15	8,75	40,6	37,6	16,6	311	-0,36	2,08	29,6	10,5	5,93	22,2	12,8	6,36	1634	-1,13	2,78	2,38
16	8,87	43,3	39,4	25,6	236	0,366	2,17	30,5	10,5	3,54	22,7	10,8	13,5	751	0,126	3,46	2,04
17	8,36	48,5	46,4	22,7	278	0,029	2,63	29,2	10,2	6,3	22,2	12,7	12,7		0,428	1,79	1,97
18	11,2	56	48,1	33,2	364	0,484	2,46	29,7	13,6	7,49	28,7	23,6	13,2	695	-0,19	1,89	3,46
19	12,8	62	53,3	33,7	264	0,5	2,22	34,8	15,3	5,07	22,7	16,7	10,6	706	-0,137	2,26	2,51
20	9,64	50,3	44,1	29,3	263	0,585	2,55	31,1	11,8	6,36	26,9	16,5	13,6	1483	0,163	2,14	2,61
21	6,41	34,1	31,6	17	304	0,236	2,35	26,4	7,81	5,4	24,6	19,7	15,5	723	0,599	2,42	2,61
22	7,54	47,7	39,5	31	208	0,923	3,78	28,9	9,84	5,73	18,3	17,4	8,98	1404	0,085	1,45	2
23	9,85	53,4	43,7	27	292	0,075	2,54	28,5	12,2	5,31	26,7	16,8	12,2	748	-0,707	2,68	3,03
24	8,52	37,7	36,5	21,2	257	0,394	2,1	30,3	10,2	5,92	30,6	18,8	13,9	766	-0,357	2,72	3,26
25	10,2	58,1	45,6	37,4	339	0,496	2,97	30,4	12,8	3,8	16,6	15,4	11	642	1,14	3,04	2,36
26	8,37	40,2	35,3	17,9	249	0,007	2,1	29,3	9,99	3,46	18,5	12,9	5,74	480	-1,08	3,59	1,81
27	8,46	50,3	39,9	26	218	0,24	2,83	29,6	10,6	6,19	21,5	17,9	11,1		0,143	1,65	2,2
28	9,01	43,4	41,4	25,6	277	0,365	2,38	30,2	10,8	4,1	20	12,6	11,7	738	0,65	2,8	2,14
29	11	47,3	44,9	28,7	500	0,654	2,34	28,8	13,1	5,14	24,9	17,7	15	847	0,818	2,87	2,81
30	5,45	32,9	24,6	16,8	185	-0,068	2,42	27,8	6,64	2,72	15,4	11,2	11,3	1426	1,36	4,11	1,42
31	7,24	42,3	32	23,7	295	0,38	2,83	27,9	9,04	3,17	13,4	7,9	6,52	669	-0,26	2,09	1,55
32	8,59	47,1	39,1	29,8	210	0,447	2,78	32,3	10,4	4,83	21,8	16	13,1	999	0,726	2,64	2,41
33	10,1	55,2	47,9	36,1	271	0,948	3,16	30,2	12,5	6,29	30,2	20,5	18	763	0,593	2,8	2,82
34	6,91	42,2	37,1	24	315	0,53	3,14	26,3	8,7	5,55	16,4	16	8,13	1495	0,07	1,32	1,96

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>2DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>Delta</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>2DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>Delta</sub>
35	8,53	37,6	35,5	20,4	276	0,336	1,96	30,9	9,95	5,22	27,6	15,1	14		0,291	2,83	2,4
36	8,55	54	47	32,1	261	0,71	3,49	31,6	11,2	5,75	21,7	13,2	9,31	1617	-0,333	1,93	2,36
37	7,24	42,3	32	23,7	295	0,38	2,83	27,9	9,04	3,17	13,4	7,9	6,52	669	-0,26	2,09	1,55
38	10,2	37,5	36,9	19,2	275	-0,039	1,66	30,4	11,5	7,93	29,4	26,8	15,6		0,379	1,87	2,66
39	9,39	54	47	33,3	223	0,464	3	30,9	12	7,09	27,7	20	14,3		-0,123	1,85	2,59
40	8,49	42,9	36,4	22,4	231	0,144	2,1	28,7	10,2	9,64	30,4	28,6	15,8		0,095	1,44	2,62
41	8,3	49,2	38,8	25,9	269	0,236	2,75	29,3	10,3	6,45	27,9	18,1	15	610	0,09	2,2	2,23
42	8,57	49	43,3	28,2	233	0,489	2,89	30	10,9	6,04	22,4	19,7	11,1	954	-0,096	1,75	2,82
43	5,28	30	29,4	15,5	214	0,139	2,67	27,4	6,61	7,39	25,4	16,9	12,3		-0,152	1,68	2,06
44	8,2	52,5	43,4	34,7	196	0,73	3,56	29,6	10,5	3,32	14,5	7,51	7,73		0,15	2,2	1,56
45	10,4	60,4	45,2	28,2	253	-0,407	3,13	32,7	13,2	4,67	22,2	12,6	8,82	1213	-0,744	2,82	2,63
46	5,84	29	27,6	16	256	0,345	2,15	24,9	6,93	10,9	39,5	29,9	24		0,574	2,02	3,4
47	7,37	56,7	38	33,9	205	1,03	5,11	28,3	10,4	3,83	17,7	14	8,85	1191	-0,186	2,19	1,76
48	8,92	43,2	42,1	20,7	304	0,211	2,18	29,3	10,7	8,01	29,4	24,9	10,5		-0,583	1,92	2,39
49	9,47	55,2	41,7	27,6	265	0,246	2,7	31,7	11,5	5,02	20,8	12,7	9,45	862	-0,299	2,14	2,18
50	7,96	41,8	37,6	20,2	298	-0,079	2,38	27,9	9,83	7,12	30,7	23,5	13,9	721	-0,36	2,26	3,38
MEAN	8,759	47,168	40,314	26,066	260,900	0,311	2,666	29,852	10,747	5,923	24,230	16,988	11,863	665,320	-0,039	2,310	2,450



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
1	6,34	40,4	32,8	22,1	207	0,475	2,69	17,9	7,77	6,01	28,3	17,5	12,2	983	-0,39	2,55	1,94
2	6,2	43	33	28,2	207	0,881	3,75	19	7,72	3,84	16,1	7,83	8,88		0,125	2,04	1,2
3	5,27	42	30,9	22,6	166	0,22	3,82	19	6,92	6,17	24,5	14,6	13	1237	0,08	1,8	1,73
4	6,28	47,2	31,7	27,5	210	0,52	3,62	17	8,2	4	16,4	11,3	7,04	1500	-0,38	2,04	1,23
5	5,42	43,9	30,9	26,6	219	0,556	3,93	18,6	7,04	9,23	35,9	17,7	19,6		0,21	1,88	1,64
6	6,27	34,9	29,4	19,4	205	0,241	2,52	17,4	7,64	3,93	15	7,91	7,78	2012	0,147	1,82	1,13
7	5,77	37,5	30	20,1	222	0,36	2,83	15,9	7,15	3,58	13	9,78	5,87	1401	-0,087	1,6	1,45
8	7,89	47,5	40,6	30,3	278	0,8	3,14	18,2	9,95	4,41	20,7	11,3	9,73	1036	0,01	2,12	1,56
9	6,15	36,8	31,6	20,6	204	0,49	2,69	19,3	7,5	4,62	21,8	11,5	11,8	1421	0,326	2,33	1,62
10	6,13	45,2	34,3	28,1	224	0,45	3,42	15,9	8,04	2,17	11,3	6,36	6,83	937	0,65	2,96	1,06
11	5,73	43,7	28,7	25,5	173	0,54	3,8	16,3	7,36	5,21	19,9	10	9,2	2412	-0,41	1,9	1,38
12	5,27	38,6	30,3	22,3	189	0,57	3,55	14,9	6,78	3,89	18,2	11,2	7,65	922	-0,566	2,4	1,6
13	6,31	51,5	35	33,2	149	0,42	3,8	20	7,97	1,38	7,1	4,27	3,07	891	-0,43	2,59	0,854
14	6,59	49,8	32,8	33,2	241	0,901	4,21	18,5	8,41	6,48	31	12,8	19	1110	0,843	2,89	1,98
15	7,45	42,7	33,5	25,4	237	0,383	2,37	18,1	8,89	6,28	26,4	19,5	14,4	1041	0,306	1,99	2,39
16	5,09	32,9	29,7	18,3	153	0,199	2,72	16,9	6,41	5,16	20,5	13	10,4	1437	-0,363	1,96	1,82
17	5,2	26,3	25,9	14,6	164	0,418	2,38	17	6,32	2,2	14,5	9	6,79	637	0,556	3,09	1,82
18	4,86	29,8	25,4	17,7	139	0,409	2,67	17,1	6,06	2,67	13,4	8,65	6,21	532	-0,068	2,64	1,34
19	6,05	29,6	28,6	15,7	248	0,321	2,1	14,6	7,12	3,76	12,3	11,3	4,7	800	-0,45	1,66	1,57
20	5,62	42,3	29,1	24,1	182	0,601	3,88	17,8	7,26	2,34	8,87	7,63	4,03	1163	-0,038	1,58	1,04
21	5,43	32,8	26,2	21,6	166	0,65	2,97	17,2	6,67	3,72	15,6	10,8	6,04	602	-0,597	2,35	1,68
22	4,89	30,4	27,1	19	199	0,604	3	17,2	5,96	4,4	13,8	11,8	6,44		0,03	1,45	1,38
23	4,31	26,8	20,1	14,6	152	0,239	2,66	16,7	5,2	3,25	12,7	10,5	6,52	1131	-0,18	1,77	1,12
24	6,35	33,7	31,2	19,7	237	0,418	2,46	16,4	7,62	3,54	18,2	9,45	10,6	1588	0,084	2,51	1,64
25	6,98	46,8	41,1	24,8	265	0,78	3,39	21,1	9,11	7,25	23,4	21,1	12		0,03	1,53	1,95
26	6,72	38,9	34,7	24,5	131	0,78	3	22,2	8,46	3,24	13,8	8,5	5,61		-0,34	2,01	1,34
27	5,9	31,7	28,6	15,2	204	0,085	2,29	17	7,09	5,99	24,4	15,2	10,4	1510	-0,49	2,16	2,2
28	6,59	40,8	34,7	25,9	157	0,656	3,03	20,8	8,17	2,87	12,9	9,36	6,39	1288	0,245	2,06	1,39
29	7,63	50,9	37,5	29,1	202	0,728	3,24	21	9,67	5,86	24,2	17,4	13,1	1250	0,085	2,08	2,23
30	6,12	43	38,1	26,6	245	0,725	3,94	17,6	8,26	2,51	10,9	8,38	5,49	860	-0,02	2,05	1,3
31	5,59	33,3	28,6	17,7	212	0,253	2,8	14,5	6,93	3,56	14,5	8,29	5,85	1483	-0,75	2,26	1,28
32	7,38	47,8	36,9	22,3	254	-0,007	2,85	18,3	8,98	9,6	29,8	22,4	14,4	1532	0,039	1,5	2,58
33	4,55	33,2	28,8	16,7	164	0,179	3,47	17,3	5,83	3,15	13	9,21	7,4	1594	0,495	2,18	1,45
34	5,5	35,1	31,2	21	167	0,696	3,36	16,5	7,09	3,26	17,8	12,8	11,2	592	0,462	2,78	1,84

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sh</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delq</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>delq</sub>
35	6,53	51,3	36,3	32,9	244	0,92	4,88	17,6	9,23	5,88	24	19,2	11,2		-0,103	2,04	2,23
36	5,77	33,1	28,3	20	158	0,467	2,61	17,9	6,94	3,4	11,2	9,45	5,02	1037	-0,168	1,59	1,06
37	5,22	35,4	29,8	20,9	167	0,548	3,57	17,7	6,91	4,06	13,9	13,3	5,56	1141	-0,604	1,86	1,44
38	8,01	35,9	34,4	21,5	311	0,507	2,18	19,1	9,49	5,84	20,9	13,6	7,24		-0,839	2,2	2,05
39	8,16	50	41,1	29,3	226	0,369	3,01	20	10,3	2,21	10,1	6,84	4,19	668	0,008	2,02	1,45
40	6,48	33,4	31,6	20,6	278	0,479	2,54	16,3	7,71	3,23	13,2	7,05	6,08	810	-0,252	2,04	1,22
41	7,73	46,8	36,4	26,1	142	0,405	2,96	21,4	9,86	4,29	14,7	8,94	7,51		0,111	1,71	1,47
42	5,3	31,7	27,2	16	140	0,077	2,6	20,2	6,46	3,99	14,5	8,46	7,47	1542	-0,008	1,77	1,28
43	7,09	45,7	33,9	21	150	0,202	2,72	21,9	8,64	6,37	20,9	14,6	10,1		-0,028	1,5	1,65
44	5,56	34,7	31	22,8	141	0,81	3,34	19,3	7,11	3,7	15	11,2	7,22	795	-0,244	2,02	1,55
45	5,65	39,4	32,8	25,7	256	0,803	4,46	17,9	7,49	3,48	12,3	10,8	7,34		0,758	1,98	1,33
46	5,49	38,1	27,8	24,9	186	0,81	3,99	17,2	7,28	2,76	11,3	9,57	5,9	1199	0,046	1,95	1,35
47	5,99	32	30,2	17,6	221	0,299	2,37	15,3	7,21	3,71	14,5	11,9	5,69	1082	-0,78	2,25	1,52
48	5,88	30,4	25,3	16,7	136	-0,192	3,79	14,7	5,16	2,3	9,66	6,72	4,27	1393	-0,461	2,14	1,1
49	7,87	45,8	39,9	28	257	0,367	2,88	20	9,97	3,1	13,4	11,8	7,84	725	0,435	2,24	2
50	6,18	38,6	33,9	22,9	227	0,347	2,8	17,8	7,57	2,39	11,8	8,71	4,24	602	-0,94	3,12	1,4
MEAN	6,135	39,062	31,778	22,822	200,240	0,475	3,141	17,950	7,658	4,205	17,031	11,409	8,330	917,920	-0,078	2,099	1,553



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>2DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>5m</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>0aIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>2DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>5m</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>0aIQ</sub>
1	7,69	49,8	37,3	29,1	243	0,65	3	19,2	9,53	9,05	34,5	26,9	15,9	878	-0,07	1,76	3,02
2	11,6	78,4	55,7	42,3	308	0,32	2,93	19,8	14,7	8,02	33,2	22,5	19	983	0,517	2,07	3,62
3	8,57	53,8	42,3	32,8	277	0,653	2,91	17	10,8	9,13	38,1	28,3	24,1	1130	0,815	2,4	3,8
4	8,62	44,2	37,3	26,5	198	0,514	2,54	15,1	10,7	9,32	39,1	28,2	20,2	801	0,2	2,08	3,8
5	5,3	36,5	33,3	15,3	198	-0,572	3,95	16	7,03	5,36	20,9	17,5	9,95	1110	-0,372	2,01	2,12
6	6,72	38,2	33,1	24,7	186	0,85	3,29	20,9	8,33	5,88	24,6	13,5	12,4	799	-0,133	2,09	2,19
7	10,1	49,6	46,1	29,8	271	0,64	2,39	21,9	12,1	3,45	15,3	11,8	9,34	506	0,29	2,33	1,79
8	9,23	57,3	49,8	34,2	315	0,68	3,59	20,7	12,1	7,36	31,9	21,5	14,3	751	-0,378	2,21	3,55
9	8,86	65,4	39,4	39,6	228	0,8	4,59	18,6	11,8	3,51	14,1	8,82	6,09	747	-0,48	2,11	1,5
10	11,2	56,3	53,1	31,2	230	0,252	2,36	24,2	13,5	4,44	19,9	12,7	6,49	607	-1,16	3,17	2,38
11	9,34	58,7	48,4	29,7	306	0,194	2,64	21,6	11,3	9,1	40	29,7	21	690	0,044	2,25	3,94
12	12,6	64,3	54,9	32,8	222	0,26	2,32	26,8	15,3	7,84	30,5	24,1	12,1	1530	-0,65	2,19	3,21
13	11,7	61,5	53,2	31,5	294	-0,203	2,44	23,1	14,3	5,6	20,5	19	9,7	691	-0,24	1,79	2,75
14	11,6	52,6	50	31,6	195	0,584	2,27	33,5	13,9	6,58	27,4	24,7	10,4		-0,894	2,58	2,77
15	10,8	49,6	48,3	31,5	250	0,706	2,59	33,2	13,1	8,82	35,9	26,8	14,9		-0,59	2,23	3,14
16	6,74	47,2	40,2	20,7	199	-0,05	3,23	29,4	8,47	8,43	28,4	27,6	14,6	999	-0,099	1,64	2,88
17	8,63	51,3	49,9	33,3	233	0,963	3,53	32,9	11	7,94	25,1	22,2	10,8	1278	-0,267	1,53	2,5
18	7,35	55,7	40,9	24,8	339	0,236	3,45	27,6	9,28	9,58	40,2	24,7	17,9	728	-0,659	2,28	3,67
19	7,53	42,8	40,4	26,4	196	0,775	3,18	27,9	9,73	6,75	29	22,1	15,2	750	0,29	2,06	3,29
20	10,3	47,8	42,6	25,9	321	0,055	2,07	30,8	12,1	6,27	28,8	24,5	15,6		0,836	2,48	2,77
21	5,26	27,9	26,4	15,9	203	0,283	2,73	27,2	6,49	4,58	15,8	12,7	9,21	956	0,285	1,77	1,71
22	10,2	50,8	47	29,7	383	0,511	2,44	31,4	12,3	6,14	34,5	23,2	19,3	734	-0,065	2,71	2,87
23	8,04	39,5	37,4	24	345	0,72	2,57	28,6	9,75	3,55	15,1	14	7,18	736	0,0767	2,06	2,4
24	6,58	37,7	32,6	22,8	211	0,497	2,96	28,3	8,06	6,32	21,1	13,5	12,8	1580	0,345	1,71	2,51
25	10,4	64,6	52	31,5	259	0,341	3,07	29,6	13,4	5,29	19,3	17	10,2	717	0,152	1,65	2,64
26	9,21	51,6	43,6	32,8	198	0,91	3,31	30	11,9	10,6	40,5	36,8	21,3	741	0,238	1,83	4,73
27	8,24	40,9	35,1	23,9	259	0,244	2,32	29,9	9,86	9,97	38,8	24,5	16,3	828	-0,54	2,09	3,66
28	10,9	55,6	47,7	29,5	315	0,132	2,28	32,2	13,2	5,17	23,8	18,9	13,6	543	0,285	2,43	2,79
29	6,61	35,2	31,7	19	234	0,027	2,37	25,8	8,05	8,36	37,3	24,6	20,5	1440	0,293	2,3	2,86
30	7,86	60,4	45	30,1	174	0,41	4,3	31,1	11	10,5	37,6	31,5	19,1		-0,026	1,71	3,01
31	6,68	43,2	38,7	21,2	264	0,108	2,91	29,2	8,41	13,1	39,8	27,5	25	1061	0,601	1,73	2,87
32	8,23	46,9	39,4	27,4	214	0,65	2,82	30,3	10,1	12,8	45,6	32	17,6		-0,699	2,1	3,19
33	6,63	45,1	36,2	15,3	176	-0,403	3,4	30,4	8,19	6,96	21	18,9	11,4	1281	0,275	1,42	2
34	5,69	35,9	29,7	17,3	205	0,149	2,96	24,4	7,06	5,45	22,2	17	11,3	968	-0,057	2,04	2,08

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delta</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DelQ</sub>
35	6,69	39,5	31,8	24,4	255	0,559	3,01	27,2	8,2	4,94	19,6	14	9,74	790	0,035	1,95	1,87
36	5,6	33,6	30,2	17,3	199	0,13	2,65	27,2	6,95	2,63	11,3	5,14	4,63		-0,145	1,85	1,18
37	9,53	51,1	50,2	24,7	280	0,159	2,48	32	11,7	6,71	32,8	25,5	20,1	1195	0,85	3,03	2,53
38	10,5	62,5	44,4	40,1	295	0,757	3,6	29,6	13,4	4,06	18,2	15,3	6,03	1033	-0,95	3,06	2,25
39	11,3	56,8	47,9	29,4	272	0,193	2	33,4	13,1	11,6	39	38,6	15,3	1043	-0,378	1,72	4,76
40	12,8	72,7	69,5	44,5	313	0,609	2,98	36,1	15,9	5,78	26,6	20,4	11,3	1358	-0,605	2,51	2,87
41	8,61	48,6	42	28,5	231	0,289	2,56	32,6	10,5	4,5	16,9	15,6	8,79	1100	0,123	1,76	2,21
42	8,01	54,3	41,2	30	288	0,347	3,49	30,3	10,1	11,2	39,1	31,8	22,5		0,299	1,74	3,25
43	10,4	58	52	36	285	0,564	2,8	29,6	12,9	3,54	14,9	10,5	9,43	701	0,673	2,45	2,21
44	7,38	43,9	33	26,9	210	0,715	3,31	27,4	9,2	7,81	37	29	20,3	1058	-0,202	2,18	2,81
45	13,8	58,2	48,2	37,2	318	0,696	2,32	34	16,2	8,9	39,6	29	22,2	648	0,474	2,35	4,16
46	10,4	56	47,1	33,7	313	0,852	2,86	31,9	12,8	4,54	15,6	9,64	7,19	1547	-0,101	1,58	2,52
47	7,41	46,5	39,5	28,9	249	0,923	3,86	28	9,63	9,79	29,4	16,1	13,9		-0,294	1,45	2,08
48	7,83	37,3	36	20,2	274	0,34	2,01	29,7	9,15	6,21	27,1	22,5	17,3	789	0,391	2	3,23
49	8,79	49,9	45,1	27,9	238	0,376	2,66	30,3	10,9	10,8	45,1	31	27,2	1256	0,541	2,32	3,94
50	7,48	41,8	39,7	28,1	301	1,13	3,78	28,7	9,43	3,53	14,6	11,2	4,86		-0,385	2,07	1,21
MEAN	8,831	50,140	42,730	28,238	255,400	0,431	2,922	27,532	10,938	7,155	28,332	21,490	14,311	781,620	-0,030	2,097	2,822



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
1	7,37	44,5	31,4	28,3	352	0,624	2,98	24,7	9,13	4,38	28,2	17,2	11,5	390	-1	3,89	2,24
2	10,2	46,3	42,1	25,1	201	0,544	2,11	31	12	7,96	36,9	28,4	20,5	970	0,33	2,46	4,17
3	10	49,4	43	27,2	333	0,38	2,26	29,1	11,8	9,75	48	36,7	34,9	1378	1,35	3,67	4,39
4	15	76,5	69,3	46,6	436	0,715	2,83	33	18,5	12,1	52,6	35,2	33,8	829	0,936	2,77	6,17
5	6,01	42,3	25,2	25	165	0,513	3,91	25,6	7,95	4,7	17,8	14,3	10,2	860	0,366	1,78	2,15
6	10,4	51,7	50,1	34,5	193	0,91	3,11	29,6	13,3	8,65	29,2	27,6	13,6	911	-0,17	1,61	3,83
7	8,25	42	39,5	22,8	331	0,583	2,47	28	9,97	9,12	39,8	28,4	19,4	561	-0,075	2,26	3,72
8	11	87,5	66	51,9	202	0,742	4,46	33,4	15,1	10,8	34,7	29,6	19,8	1345	0,165	1,53	2,73
9	11	54,6	51,3	33,7	234	0,5	2,5	32,8	13,6	20,1	65,4	59,3	43,3	1295	0,578	1,7	5,68
10	11,6	67,4	59,8	38,5	262	0,628	2,83	34	14,6	6,31	26,8	21,4	13,4	600	0,08	1,94	2,96
11	8,79	47,2	35,9	21,5	254	-0,009	2,3	27,9	10,4	7,29	31,2	24,1	17,8	558	0,497	2,3	3,69
12	9,86	73,6	54,1	37,1	378	0,8	3,97	32	12,8	14,2	51,3	44,1	24,5	1081	-0,245	1,68	3,94
13	9,84	66,7	49,4	39,2	258	0,66	3,85	32,5	13	5,72	17,4	8,9	10,2		0,25	1,47	1,85
14	12,9	83,1	73,8	43	273	0,372	3,12	33	16,1	18,6	72,5	56,7	33,6		-0,25	1,97	5,3
15	7,29	48,4	43,9	29,4	234	1,08	4,22	30,7	10,1	8,51	29,3	22,1	19,7	1458	0,488	1,6	2,6
16	12,8	61,4	46	38,3	500	0,779	2,74	29,2	15,7	3,95	20,6	13,6	10,9	610	0,15	2,63	2,99
17	8,86	40,3	39,7	17,7	326	-0,047	2,09	28,7	10,4	10,9	44,8	30,9	20,3	1316	-0,36	2,12	3,8
18	11,2	63,9	52,6	37,7	457	0,384	2,83	31,1	13,9	10,3	41,4	35,4	20	716	-0,13	1,91	4,44
19	12,9	77,3	63,1	33,4	231	-0,276	3,11	35,5	15,9	11,9	46,8	29,9	18,4		-0,667	2,27	3,69
20	9,23	54	41,1	28,7	237	0,287	2,68	30	11,8	5,72	25,9	19,9	13,3	604	-0,016	2,17	2,53
21	13,4	73,4	59,6	40,4	300	0,394	2,6	34,4	16,9	13,6	61	44,8	32	653	0,027	2,31	4,99
22	8,16	43,3	38,8	26,9	255	0,814	2,96	26,8	10,8	14,4	44,6	35,3	20,8		-0,119	1,45	4,24
23	9,24	47	40,6	24,4	399	0,094	2,28	30,7	10,9	10	41,3	28,9	20,4	726	-0,001	2,07	4,01
24	11,2	61	53,4	34,1	338	0,565	2,56	30,8	13,6	4,73	21	17	9,51	1279	-0,365	2,26	2,6
25	10,4	46,2	39,9	23,7	414	0,163	1,91	29,1	12,1	8,97	36,5	30,2	18,3	1329	-0,01	2,04	3,16
26	7,22	45,6	35,4	28,7	311	0,858	3,55	28,4	9,15	10,7	38	27,3	22,5	1472	0,122	1,52	3,12
27	10,5	60,6	46	28,3	399	-0,122	2,25	31,5	12,3	7,32	28,2	23,8	10,9		-0,48	2,12	2,92
28	11,4	60	56,5	30,5	339	-0,015	2,22	33,9	13,9	8,5	35,3	24,9	11,3		-1,17	3,01	2,73
29	10,5	51,7	47,2	29,5	431	0,727	2,66	28,9	12,8	6,96	36,6	26,1	13,9	811	-0,803	3,29	3,54
30	13,2	84,8	59,3	46	406	0,233	3,49	30,9	17	7,34	42,4	27	13,4	599	-1,47	4,44	4,12
31	8,28	47,8	41	21,9	288	0,134	2,47	30,3	10,1	2,96	21,2	12,8	12,9	688	0,266	4,22	2,05
32	6,67	36,7	31,5	18,8	233	0,326	2,43	28,4	8,07	7,57	28,2	22,5	18,4		0,825	2,31	2,64
33	8,93	55,6	51,1	30,5	256	0,177	2,84	29,8	11,7	11,6	55,4	38	32,4	1073	0,416	2,75	4,28
34	10,9	49,2	43,7	31	401	0,687	2,43	28,8	13	11,2	47,2	31,8	22,4	776	-0,235	2,1	5,23



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>oIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>oIQ</sub>
35	13	80,9	65,8	44,6	278	0,5	3,06	32,3	16,6	17,5	71,2	52	42,9		0,642	2,3	5,91
36	10,4	56,3	50,6	34,3	254	0,549	2,78	32,4	12,8	12,2	45,4	25,2	27,4		0,741	2,14	2,99
37	11	52,2	45,8	25,2	210	0,176	2,1	35	13	3,72	15,8	8,59	4,23		-1,32	3,49	1,46
38	9,42	53,4	49,7	27,5	320	0,318	2,76	30,8	11,9	11,2	43,5	38,3	21,5	1265	-0,025	1,82	3,93
39	13,3	58,6	50,8	37	365	0,586	2,22	32,8	15,5	10,7	37,3	25,3	16,5		-0,363	1,67	3,49
40	11,7	60,3	51,9	32,3	207	0,003	2,26	40,8	14,3	7,59	25,5	24,3	13,4		0,193	1,62	2,5
41	14	110	67,6	55,8	335	0,059	4,36	34	20,2	20,4	65,3	36,5	33,6		0,194	1,57	6,17
42	10,9	52,7	49	26,5	464	0,322	2,11	32,7	12,8	7,1	33,4	26,7	15,2	740	-0,358	2,5	3,64
43	12,4	87,8	67,1	45,7	279	0,298	3,68	33,8	15,8	10,7	47,1	34,8	20,5	917	-0,099	2,03	3,32
44	11,9	59,7	58,3	28,3	222	0,02	2,32	38,7	14,5	11,6	39,9	34,5	21,5		0,364	1,68	3,68
45	10,8	52,1	50,3	27,1	213	0,133	2,19	30	13,4	9,33	40	26,1	20,2	1116	0,007	2,18	4,04
46	10,5	58,7	50	33,7	445	0,686	2,95	25	13,4	11,3	45,1	43,9	27,5	772	0,603	2,24	5,45
47	12,1	46,2	44,5	23,5	382	-0,05	1,66	30,6	13,6	6,61	31,9	18,5	16,9	720	0,377	2,56	3,12
48	8,66	51,2	42	30,7	309	0,303	2,63	29,9	10,9	8,95	36,5	25,9	22,9	763	0,466	1,91	4,47
49	9,84	56,1	43,6	35,8	345	0,608	2,6	28,4	12	14,8	52,1	48,2	31,9	544	0,463	1,75	6,28
50	13,4	69,3	63,2	43,9	273	0,75	2,79	33	16,5	6,46	31,8	18,1	11,7		-1,18	3,33	3,17
MEAN	10,556	58,930	49,430	32,524	310,560	0,409	2,790	31,094	13,111	9,739	39,186	29,220	20,321	634,500	0,000	2,288	3,722

a/a	R <sub>g</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delQ</sub>	R <sub>y</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>delQ</sub>
1	6,03	37,9	28,8	21,9	217	0,151	2,55	17,6	7,25	5,58	26,5	14,8	13	828	0,04	2,17	2
2	6,46	41	29,4	24,5	238	0,178	2,63	15,2	7,78	7,27	28,2	17,8	14,9	1020	0,2	1,88	2,01
3	7,15	50,6	38,6	34	257	0,934	4,5	16,5	9,32	5,85	27,2	18,8	12	905	-0,33	2,29	2,39
4	5,32	45,5	28,5	20,8	171	0,0001	3,67	17,4	6,79	5,67	23,5	10,8	12,8	1941	0,029	2,06	1,34
5	7,26	46,4	34	28,4	240	0,568	3,03	18,1	9,06	6,73	35,3	19,4	13,1	1036	-1,03	3,38	2,54
6	3,06	23	15,8	14,9	189	0,968	4,59	9,85	4	2,88	10,7	5,83	5,68	2015	0,302	1,74	0,937
7	5,45	30,5	25,9	16,6	177	0,26	2,52	15,7	6,76	4,68	28,6	13,9	15,5	938	0,091	3,15	1,93
8	5,74	34,3	29,4	17,9	176	0,295	2,56	15,1	7,1	7,1	28,3	15,6	14,1	2196	-0,019	1,73	2,1
9	6,21	60,7	35,4	41,3	200	1,07	6,31	18,5	8,73	4,95	20,1	12,2	9,65	1722	-0,246	1,96	1,85
10	6,71	46,2	33,1	28,3	194	0,45	3,24	19,5	8,53	6,02	23,9	15,1	12,4	1234	-0,036	1,88	1,74
11	5,77	46,4	33,3	30	165	0,98	4,91	17,9	8,12	9,56	37,6	18,7	23	2884	0,63	2,18	2,09
12	4,32	37,6	24,2	25,7	227	1,14	5,87	17,4	5,78	4,67	22,9	11,7	14,1	1751	0,87	2,89	1,72
13	7,36	48,9	36,9	29	228	0,6	3,29	17,6	9,46	7,65	35,3	19,8	23,5	1386	0,931	3,02	2,73
14	6,47	45,6	31,4	29,6	257	0,653	3,81	16,6	8,23	6,06	27,4	17,9	11,2	1548	-0,37	2,38	2,22
15	6,34	45,3	35	25,7	252	0,233	3,34	17,5	8,24	5,37	28,7	12,6	12,9	1135	-0,346	2,72	2
16	7,03	42,1	34,4	21,6	270	0,177	2,68	28,9	8,78	4,83	17,7	12,8	8,2	537	-0,362	1,76	2,05
17	6,05	30,3	28,2	17,7	225	0,548	2,41	25,9	7,21	5,44	21,8	16,7	11,5	865	0,286	2,01	2,32
18	6,49	31	28,4	17,5	215	0,415	2,32	26,6	7,8	5,27	24,8	18,5	9,27	1238	-0,019	2,26	2,11
19	5,47	25,6	24,2	15,5	242	0,51	2,21	24,3	6,51	5,88	22,8	17,5	11	833	-0,228	1,92	2,17
20	6,33	31,9	28,6	16,2	335	-0,15	2,27	25	7,88	7,66	31,9	23,9	15,9	1344	0,05	2,02	2,79
21	5,74	40,5	33,5	30,6	226	1,44	5,72	26,8	7,66	3,56	8,79	6,36	5,26	746	0,196	2	1,14
22	5,37	43,8	33,3	29,1	258	1,46	6,24	24,9	7,53	3,56	14,8	10,6	8,9	654	0,805	2,54	1,61
23	6,28	41,4	33	29	419	0,795	3,75	27	7,72	8,3	34,1	24,9	15	1321	-0,51	2,2	3,03
24	6,54	45,1	40,6	28,6	339	1,12	4,38	27,6	8,91	1,92	10,7	7,64	3,69	509	-0,886	3,75	1,43
25	6	43	33,4	27,6	269	0,867	4,26	27,5	7,81	2,88	12,2	7,84	6,44	1133	-0,011	2,06	1,53
26	5,45	33,5	32,1	20,8	312	0,718	3,41	25	6,91	2,87	11,5	9,55	6,56	702	0,026	1,85	1,23
27	7,46	46,2	36,7	32	250	0,903	3,56	30,6	9,27	7,1	23,3	22,8	12,1	1147	0,129	1,58	2,1
28	6,17	38,3	36,7	23,8	407	0,617	3,48	27,1	7,79	3,43	16,7	13,4	9,4	684	0,481	2,69	1,93
29	7,57	55,7	50,5	33,2	192	0,828	4	30,8	10,6	4,12	14,3	9,36	6,79	542	-0,26	1,7	1,62
30	6,01	35,5	27,7	22,5	219	0,486	3,24	27	7,58	3,41	17,3	12,4	9,37	1141	0,122	2,57	1,3
31	5,41	45,4	35,9	22,9	186	0,234	4,16	27,6	7,21	5,72	24,1	14,5	13,1	724	0,287	2,16	2,12
32	9,01	64,2	47	38,9	320	1,02	4,58	30,4	11,8	6,11	28,8	18,7	16,4	1299	0,676	2,61	2,56
33	5,01	36,3	31,9	22,9	189	0,753	4,58	26,4	6,85	4,91	19,6	12,4	11,1	1497	-0,07	1,69	1,85
34	7,72	50,7	38,5	33,6	293	0,874	3,71	29,2	9,74	2,49	10	8,23	5,13	397	-0,097	1,9	1,37

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DelQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DelQ</sub>
35	7,25	55	40,5	38,3	235	1,36	5,4	29,3	9,93	6,21	21,2	17,9	10,1	1407	-0,208	1,67	2,18
36	6,85	45,8	39,8	30,1	196	0,596	3,28	27,5	8,61	2,84	12,7	12	5,7	556	-0,108	1,96	2,15
37	6,48	43,2	36,9	30,2	357	1,28	4,81	28,4	8,38	4,55	17,6	13,3	8,04		-0,344	1,96	1,66
38	5,8	33	31	18,5	167	0,273	2,61	29,1	7,17	9,58	35,1	29,8	16,5		0,134	1,67	2,84
39	7,33	40,3	26,2	24,2	217	0,316	2,31	28,6	8,64	7,83	26,1	16,6	13,3		-0,015	1,53	2,58
40	6,22	34,7	31,1	20,4	182	0,373	2,64	26,1	7,8	6,64	25,9	21,1	11,6	1089	-0,167	1,94	2,02
41	5,79	37,2	31,2	25,6	287	0,86	3,96	24,4	7,42	3,74	15,5	11,3	8,17	1264	0,02	2,05	1,42
42	8,27	56,3	43,7	38,5	235	1,15	4,48	29,9	10,9	5,45	26,6	22,5	15,8		0,91	2,95	2,42
43	7,03	47,4	38,7	33	259	1,33	4,61	28,7	9,43	6,5	25,9	20,8	12,3	807	-0,098	1,97	2,49
44	6,93	37,9	34,6	22,7	223	0,365	2,52	27,4	8,56	8,47	31,1	22,6	13,7	1017	-0,158	1,82	2,35
45	5,11	31,9	26	16,3	202	0,016	2,9	24,4	6,7	6,49	28,4	20	13,4	917	-0,662	2,23	2,24
46	6,05	40,7	31,1	25,5	274	0,793	3,94	27,7	7,73	4,81	19,8	12,8	11,1	653	0,523	2,13	2,08
47	5,23	31,5	26,8	17,3	254	0,451	3,01	24,1	6,49	3,74	13,5	10,8	5,27	1275	-0,57	1,95	1,67
48	6,39	38,9	36,3	23,6	185	0,434	3,23	28,4	8,25	2,91	12,6	8,54	6,13	684	-0,035	2,17	1,39
49	5,61	33,4	28,9	22,1	165	0,622	3,04	30	7	6,18	19,3	17,3	9,83	1064	0,264	1,52	1,72
50	5,37	40,1	34,9	24	206	0,468	3,64	28,7	7,03	5,83	21,4	17	11,3	1308	-0,043	1,81	1,88
MEAN	6,249	41,354	33,040	25,658	239,960	0,656	3,683	24,235	8,015	5,394	22,442	15,347	11,304	1037,860	0,015	2,161	1,979



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sK</sub>	R <sub>Ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sK</sub>	W <sub>Ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
1	9,07	45	37,1	22,4	326	0,172	2,11	17,5	10,5	4,05	18,6	15,8	6,34	688	-0,97	3,02	2,18
2	8,68	48,3	41,3	30	276	0,51	2,53	28,3	10,8	3,2	19,6	12,8	11	579	0,192	3,37	2,28
3	8,86	66,6	53,2	41,5	161	0,826	4,38	31,3	12,2	7	24,1	21,3	12,1	474	-0,075	1,56	3,08
4	7,38	51,4	36,3	23,7	173	-0,146	3,55	29,2	9,95	3,65	22,3	13,1	10,6	899	-0,089	3,3	1,95
5	7,22	37,5	32,5	20,6	293	0,44	2,49	25,7	8,74	6,88	30,8	22,4	14,4	653	-0,34	2,27	2,92
6	10,2	52,6	51	32,3	420	0,743	2,9	28,4	12,5	6,44	24,7	20,2	12,6	1252	0,058	1,84	3,05
7	9,79	66,7	45,5	39	230	0,52	3,44	31,7	12,8	7,14	39,8	27,6	25,9	670	0,475	2,81	3,5
8	13,7	66,3	57,9	37	428	0,668	2,3	33	15,9	11	44,7	35,6	22,4	845	0,076	2	4,52
9	9,81	56	54	32,9	398	0,393	2,91	28,9	12,2	5,17	24,9	20,3	13,2	555	0,375	2,46	3,16
10	9,66	69,2	54,2	44,4	203	0,92	4,49	35,2	13	10,9	40,3	38,6	19,3	1175	-0,16	1,77	3,85
11	12	80,2	55,7	43	395	0,141	3,4	29,6	15,3	22	72,3	62,9	44,4	1245	0,413	1,61	6,32
12	11,2	48	43,9	27,8	361	0,401	2,05	30,1	13,2	9,6	49,1	33,7	22	318	-0,155	2,42	3,82
13	9,59	49,7	45,2	26,2	314	0,17	2,05	28,7	11,2	14,9	49	45,2	22,8	1203	-0,27	1,57	4,6
14	14,4	66	62,5	38,7	346	0,56	2,24	35,6	16,8	16	57,6	47,4	25,7	799	-0,245	1,72	6,59
15	7,42	34,2	31,9	18,7	337	0,41	2,1	26,9	8,68	8,6	26,1	22,8	14,8	1023	0,26	1,4	2,64
16	5,3	31	26,2	20,7	207	1,01	3,48	23,9	6,93	7,51	28,5	21,2	12,6	755	-0,44	1,9	2,89
17	10,1	60,6	45,1	34	398	0,676	3,44	28,9	13,1	14,3	49,9	34,4	30,2	1606	0,614	1,88	4,68
18	8,47	41,8	37,1	24,5	284	0,716	2,52	28,2	10	9,27	35	23,1	21,3		0,686	2,14	2,83
19	10,9	52,6	47,9	25	300	-0,04	2,08	33,7	12,6	17,9	59,6	51,6	25,4		-0,263	1,64	5,55
20	7,79	39,8	34,4	26	374	0,75	2,89	26,9	9,29	5,79	30,3	23,5	13,8	1020	-0,13	2,73	2,51
21	8,84	56,9	39,5	31,8	210	0,311	2,92	29,7	11,5	7,23	31,8	15,9	21,6	380	1,15	3,12	2,69
22	11,7	67	53,4	38,4	300	0,7	2,92	29,2	15,3	13,4	62,8	42,2	35,8	720	0,53	2,51	6,46
23	8,9	67,1	47,1	40	276	0,696	4,81	27,1	13,3	6,51	33,5	26,5	18,6	800	0,45	2,76	3,44
24	8,73	60,5	57,5	38	117	0,843	4,23	34,1	12,3	7,95	31	27,1	13,8	1240	-0,38	2	2,99
25	6,28	41,7	34,9	19,2	237	0,397	2,64	28,3	7,58	13,5	47,1	35,7	27,5	1160	0,51	1,89	3,22
26	8,78	66,1	46,7	40,8	229	0,877	4,77	30,5	12,2	16,8	55,5	50,8	29,7	1200	0,214	1,55	4,6
27	8,83	46,4	41,3	28	239	0,585	2,69	31,4	10,7	11,3	36,3	24,4	19,8		317	1,51	2,77
28	11,3	67,1	52,7	39,7	339	0,52	3,33	28,7	15,2	7,33	32,2	26,3	17,4	948	0,184	2,21	3,72
29	9,88	70,1	49,1	46,5	218	1,33	5,4	30,9	13,8	8,85	42,7	26,8	14,3	967	-0,128	3,56	3,76
30	6,43	43	32,8	28,7	358	1,27	4,29	25,7	8,31	7,57	21,9	21	12,6		0,283	1,4	2,37
31	9,73	53,2	38,8	30,5	374	0,11	2,56	29	11,8	13,5	45,2	25,2	18,8	1588	-0,53	1,76	4,23
32	8,9	47,3	46,2	21,8	250	-0,328	2,5	30,2	11,2	6,39	21	19,1	10,8	1266	0,2	1,49	2,71
33	13,1	65,3	54,9	33	353	0,171	2,17	32,7	15,4	13,9	53,4	48	27,3	1214	-0,02	1,82	5,53
34	11,1	78,6	51,7	48,5	375	0,908	4,34	29,7	14,9	13,8	52,4	31,7	21,9	756	-0,43	1,99	4,76



a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>2DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>9m</sub>	R <sub>ek</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DelQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>2DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>9m</sub>	W <sub>ek</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DelQ</sub>
35	7,38	36,5	35,1	21,4	388	0,64	2,52	27,4	9,05	11	34,7	24,6	13,6		-0,46	1,64	3,37
36	7,15	36,6	32,6	18,1	182	0,08	2,3	27	8,74	12,1	43	31,9	24,3		0,31	1,8	4,04
37	9	50,3	43,8	33	217	0,802	3,31	30,4	11,3	7,33	40,2	21,4	23,9	1192	0,046	2,6	3,7
38	7,09	41,8	36,6	24,7	195	0,888	3,22	30,3	9,01	10,9	39,3	25,4	22,7		0,453	1,88	3,02
39	12,7	78,3	67,5	34,5	204	-0,29	2,82	37,1	16,3	8,08	30,6	27,2	14,6	1051	-0,048	1,76	4,3
40	9,67	69,6	50	39,8	236	0,687	3,98	33,4	12,2	9,2	29,3	21,3	13,6	871	-0,18	1,53	3,19
41	10,9	86,8	57,7	41,4	209	0,099	4,4	32,1	16,2	9,17	37,8	34,8	18,5	769	-0,188	2	4,01
42	14,9	72,4	63,8	34,9	306	0,025	1,95	36,6	17	7,45	31,5	23,2	11,7	727	-0,79	2,56	3,61
43	10,2	55,6	50,1	32,8	296	0,67	2,78	29,5	12,5	9,43	31,6	28,1	18,2	894	0,27	1,62	3,68
44	11,7	59,9	52,4	37,2	383	0,527	2,55	31	13,9	11,4	44,9	34,3	27,8	760	0,786	2,34	4,8
45	9,61	48,7	48,3	29,6	321	0,61	2,61	28,2	12,2	6,57	25,4	21,5	11,2	915	-0,198	1,87	3,41
46	9,34	47,6	38,4	21,9	256	-0,033	2,19	29,7	11	8,53	31	29,1	14,1	1099	-0,205	1,75	3,71
47	9,19	54,1	41,6	31,3	240	0,235	2,7	27,6	11,7	9,74	34,4	28,6	17,4		0,085	1,6	3,23
48	6,71	54,4	37,4	28,7	202	0,726	4,7	24,9	9,45	5,65	34,5	21	22,7	820	0,983	4,17	2,73
49	8,24	46,2	40,3	24,1	248	0,349	2,57	29,2	10,1	11,2	33,4	23,3	16,9		0,108	1,39	2,89
50	8,63	56,2	40,5	25,7	270	-0,157	3,48	28,3	11,2	9,28	26,7	13,4	15,6		0,31	1,38	2,08
MEAN	9,529	55,776	45,512	31,448	285,040	0,482	3,100	29,632	12,021	9,727	37,246	28,466	19,151	741,920	6,407	2,097	3,639

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>2DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>3m</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>delia</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>2DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>3m</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>delia</sub>
1	12,7	63,6	52,8	37	278	0,528	2,36	29,6	15,3	13,5	46,6	39,1	22,4	729	-0,143	1,62	5,25
2	13,1	63,8	59,9	42,6	436	0,966	3,01	32	16,4	16,9	67,7	57,7	34,8	933	-0,01	1,94	7,45
3	11,8	60,5	50,2	35,2	370	0,62	2,57	31,8	14,4	19,9	72,3	60,1	36,9	1248	-0,107	1,81	5,86
4	14,5	81,2	68,5	42	298	0,337	2,59	34,4	18,3	19,6	63,2	31,5	34		0,0006	1,51	5,19
5	9,27	59,1	52,5	33,8	214	0,787	3,23	33,8	13,5	32,9	105	96,6	54,6		0,195	1,51	8,38
6	10	50,9	44,4	31,8	353	0,747	2,93	27,4	12,7	20,5	62,2	59,6	33,2	1337	0,147	1,4	5,67
7	17,7	89,9	84,6	48	315	0,244	2,33	36,5	21,5	14,7	48,5	30,6	20,7	1637	-0,566	1,73	4,7
8	10	47,1	41,2	21,6	231	-0,193	2,03	33,9	11,7	7,47	29,3	20,9	14,8	972	0,077	1,89	3,03
9	12,7	69,3	54,1	42,6	390	1,01	3,36	30,2	15,9	16,3	72,1	57	41,2	577	0,475	2,37	6,76
10	15,1	72,7	67,3	40,5	405	0,377	2,25	28,6	18,4	13,6	58,1	41,3	35,2	1043	0,65	2,46	6,29
11	16,3	93	71,2	64,4	401	1,07	4,13	32,8	20,9	20,9	68,7	63,4	37	614	0,18	1,57	8,03
12	10,1	49,2	46,1	31,7	282	0,68	2,47	30,8	12,2	12,5	51,1	37	24,9	814	-0,026	2,03	5,13
13	16,8	80,2	72,4	48,1	319	0,477	2,33	34,7	20,4	17,3	70,7	54,1	31,4	800	-0,301	2,07	7,29
14	13,5	66	64,2	29,5	262	-0,187	2,28	38,5	16,5	12,1	46,1	32,3	24	1279	0,308	1,81	5,56
15	10,9	70,7	48	38,3	205	-0,237	2,78	36,8	14,2	13,9	61	45,2	27	1056	-0,5	2,32	5,66
16	6,44	34,2	30,3	17,5	144	-0,198	2,39	34,9	7,97	9,34	35,1	25,3	12,6	1432	-0,745	2,27	3,89
17	6,6	46,6	37,9	28,4	129	0,88	4,41	42	8,78	19,8	76,5	58,5	45,2	1442	0,375	20,4	4,73
18	7,02	47,5	36,5	22,4	250	0,289	3,32	26,3	9,15	10,3	36	25,6	14,9	848	-0,505	1,83	3,07
19	11,2	59,6	43,4	34,1	278	0,493	2,56	29,5	14	13,6	49	37,3	24,4		-0,188	1,76	4,54
20	9,08	43,5	39	27,4	249	0,796	2,72	26	11,3	12,1	42,9	40	19,9	1071	-0,257	1,66	4,78
21	9,49	46,3	37,9	23,9	356	0,417	2,21	27,2	11,3	6,93	35,2	19	19,7	366	0,545	2,71	2,85
22	6,78	34,5	30,1	31	307	0,542	2,65	26,5	8,27	9,01	42,2	26,3	28	796	1,14	3,32	3,79
23	9,75	63,4	48	28,3	361	-0,333	3,46	29,6	12,3	11,5	45	38,6	24		0,259	2	3,98
24	7,64	43,1	28,7	27,9	388	0,95	3,48	23,1	9,53	5,47	28	18,4	18,3	727	0,888	3,52	2,87
25	9,66	51,7	45,6	30,2	186	0,307	2,64	31,2	11,9	4,9	21,6	16,3	11,8	1241	0,238	2,19	3,12
26	9,89	45,2	38,9	22,3	254	-0,06	1,85	29,5	11,4	14,8	51,7	41,2	24		0,171	1,46	4,8
27	9,77	52,5	47	29,4	328	0,31	2,68	28,3	12,1	4,02	24,2	17,3	10,2	1284	-0,18	3,16	2,56
28	8,5	44,3	37,2	27,1	319	0,405	2,49	27,8	10,3	12,5	39,9	34,8	18,1		-0,15	1,39	3,34
29	8,96	60,7	46,2	32,9	349	0,87	3,62	30,5	11,3	4,2	17,2	14,5	7,72	481	-0,22	2,07	2,14
30	6,48	36,7	31,3	20,1	156	0,62	2,79	26,3	8,13	7,35	26,7	14,3	15,1		0,436	1,83	2,31
31	12,4	80,9	62,6	51,7	357	1,16	4,14	30,3	16,6	11,5	50,4	42,7	23,9	923	-0,366	2,26	5,77
32	10,8	56,7	49,2	30,4	285	0,51	2,48	29	13,5	8,4	42,2	27,2	26,2	863	0,92	3,17	3,78
33	8,37	48,3	39,4	27,7	266	0,53	2,8	28,9	10,2	7,66	31,2	22,4	15,7	744	0,007	2,02	3,33
34	9,11	65	41,2	32,9	216	0,66	3,25	33,5	11,2	20,9	65,1	60,5	26,1	1295	-0,42	1,62	5,5

a/a	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DelQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DelQ</sub>
35	11	58,9	48,6	35,1	249	0,578	2,63	31,4	13,1	15,3	59,6	34,3	33,9	863	0,32	2	5,32
36	11,6	56,1	51,8	33,6	361	0,564	32,35	30,3	14,2	11,5	44,5	22,3	27,6		0,702	2,21	3,67
37	15,2	70,2	57	46	619	1,09	2,9	29,2	18,4	16,3	69,1	43,5	44,5	555	0,901	2,65	7,71
38	8,5	40,6	38,3	23,6	375	0,385	2,34	27,2	10,2	6,1	19,9	12,8	9,83	700	-0,17	1,56	2,27
39	6,47	44,2	36,3	19,5	157	-0,019	3,01	29,6	8,23	8,82	30,3	19	17,9	952	0,46	1,86	1,97
40	12,5	66,2	58,5	30,7	470	0,253	2,27	32,6	14,9	4,32	24	15,2	9,83	611	-0,08	2,31	3,52
41	15,2	73,6	56,8	47,9	504	0,903	2,83	29,5	18,4	11,1	52,2	37,1	35,3	699	0,996	3,32	5,47
42	11,3	63,3	47,8	38,9	325	0,694	2,95	29,9	14,1	8,76	38	29,1	16,2	780	-0,347	2,13	4,25
43	17,4	72,6	58,5	39,3	471	0,481	1,94	34,9	19,7	8,77	38	28,2	20,5	559	0,3	2,21	4,75
44	9,42	42	38,2	22,6	298	0,294	1,94	26,5	10,9	3,58	20,9	15,2	13	629	0,235	2,82	2,31
45	8,21	37,9	34,9	18,1	376	0,116	1,97	25,3	9,6	7,36	28,7	17,8	11,9	760	-0,603	2,07	3,1
46	9,48	49,8	42,1	29,5	243	0,46	2,46	30,1	11,3	11,8	55,2	40,8	17,9		-0,988	3,07	4,16
47	9,09	43,1	40,9	27	268	0,908	2,81	28	11,2	13,9	51,1	48,9	34,3		0,934	2,43	5,39
48	11,1	53,1	46,7	29	545	0,73	2,32	30	13,2	19,3	57,4	49,8	32	1226	0,215	1,46	4,8
49	11,3	58,3	52,8	31,3	382	0,55	2,36	32,9	13,6	10,5	42,3	31,3	21,5	735	0,016	1,97	4,25
50	13,9	74,9	61,7	35,5	326	-0,133	2,7	31,7	17,2	4,9	23,5	16,5	14,3	528	0,733	2,77	3,24
MEAN	10,882	57,654	48,374	32,806	318,120	0,485	3,327	30,626	13,395	12,173	46,748	35,368	24,368	722,980	0,119	2,510	4,552



Στη συνέχεια παίρνω τους μέσους όρους σε κάθε έναν από τους άνω  $50 \times 17$  υποπίνακες (δώδεκα τον αριθμό) και μεταφέρω:

- για  $T = 100 \mu\text{sec}$  και  $I =$  μεταβλητό (5, 10, 20, 30A) τους μέσους όρους όλων των παραμέτρων στον πίνακα 1
- για  $T = 200 \mu\text{sec}$  και  $I =$  μεταβλητό, ομοίως τους μέσους όρους στον πίνακα 2 και
- για  $T = 300 \mu\text{sec}$  τέλος και  $I =$  μεταβλητό, τους μέσους όρους όλων των παραμέτρων ως άνω στον πίνακα 3

Ταυτόχρονα προσθέτω στους πίνακες αυτούς και μια στήλη με τις τιμές του ρεύματος  $I$  (τιμές 5, 10, 20, 30A) οπότε έχω πλέον τρεις (3) πίνακες διαστάσεων  $4 \times 18$  (4 γραμμών διότι κάθε γραμμή αντιστοιχεί και σε άλλη τιμή του ρεύματος και 18 στηλών λόγω των 17 παραμέτρων + την στήλη για το ρεύμα). Οι τρεις (3) αυτοί πίνακες έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι όλες οι τιμές των παραμέτρων που περιέχουν έχουν μετρηθεί από δοκίμια ηλεκτροδιαβρωμένα σε ίδιο χρόνο  $T$  ανά πίνακα.

Επιστρέφω πάλι στους αρχικούς 12 υποπίνακες  $50 \times 17$ , παίρνω τους μέσους όρους για κάθε παράμετρο σε κάθε έναν απ' αυτούς και μεταφέρω.

- για  $I = 5A$  και  $T =$  μεταβλητό (100, 300, 500  $\mu\text{sec}$ ) τους μέσους όρους όλων των παραμέτρων στον πίνακα 4
- για  $I = 10A$  και  $T =$  μεταβλητό, ομοίως τους μέσους όρους όλων των παραμέτρων στον πίνακα 5
- για  $I = 20A$  και  $T =$  μεταβλητό, τους μέσους όρους των παραμέτρων στον πίνακα 6
- και τέλος για  $I = 30A$  και  $T =$  μεταβλητό, τους μέσους όρους των παραμέτρων μεταφέρω στον πίνακα 7

Ταυτόχρονα προσθέτω στους πίνακες αυτούς και μια στήλη με τις τιμές του χρόνου  $T$  (τιμές 100, 300, 500  $\mu\text{sec}$ ) οπότε έχω πλέον τέσσερις (4) πίνακες διαστάσεων  $3 \times 18$  (3 γραμμών διότι κάθε γραμμή αντιστοιχεί και σε άλλη τιμή του χρόνου  $T$ ). Οι τέσσερις (4) αυτοί πίνακες έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι όλες οι τιμές των παραμέτρων που περιέχουν έχουν μετρηθεί σε δοκίμια EDM κατεργασμένα με ίδιο ρεύμα  $I$  ανά πίνακα.

Αυτοί οι επιμέρους  $3 + 4 = 7$  πίνακες ακολουθούν στις επόμενες δυο σελίδες.



**Πίνακας 1 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσής για χρόνο παλμού  $T=100\mu s$** 

I [A]	$R_a$	$R_t$	$R_{zDIN}$	$R_p$	$R_{sm}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{Delt}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{Delt}$
5	4,245	27,656	23,156	14,296	133,220	2,968	2,968	17,606	5,328	5,328	5,328
10	5,5668	36,13	29,836	20,24	172,1	3,0966	3,0966	18,98	6,979	6,979	6,979
20	6,1348	39,062	31,718	22,832	200,24	3,141	3,141	17,35	5,6526	5,6526	5,6526
30	6,2494	41,354	33,04	25,658	239,36	3,6832	3,6832	24,235	8,015	8,015	8,015

**Πίνακας 2 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσής για χρόνο παλμού  $T=300\mu s$** 

I [A]	$R_a$	$R_t$	$R_{zDIN}$	$R_p$	$R_{sm}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{Delt}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{Delt}$
5	6,124	34,938	29,654	16,774	10,240	2,927	2,927	17,604	7,502	7,502	7,502
10	7,8898	46,57	38,17	26,412	231,96	2,9798	2,9798	19,136	9,768	9,768	9,768
20	8,8308	50,14	42,73	28,238	255,14	2,9216	2,9216	27,582	10,958	10,958	10,958
30	9,529	55,778	45,562	34,448	285,94	3,1	3,1	29,632	12,061	12,061	12,061

**Πίνακας 3 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσής για χρόνο παλμού  $T=500\mu s$** 

I [A]	$R_a$	$R_t$	$R_{zDIN}$	$R_p$	$R_{sm}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{Delt}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{Delt}$
5	5,439	31,949	27,059	14,302	209,880	-0,232	2,773	14,984	6,602	6,602	6,602
10	8,7588	47,168	40,314	26,066	260,9	0,3111	2,666	29,852	10,747	10,747	10,747
20	10,556	58,93	49,43	32,524	310,56	0,4093	2,7898	31,094	13,111	13,111	13,111
30	10,882	57,654	48,374	32,806	318,12	0,4846	3,3274	30,626	13,395	13,395	13,395



Πίνακας 4 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης για ρεύμα παλμού I=5A

T [μs]	R <sub>s</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
100	4,245	27,606	23,156	14,296	133,220	0,084	2,968	17,606	5,328	2,730	10,761	6,821	5,792	1120,520	0,079	2,125	0,983
300	6,124	34,958	29,654	16,714	190,24	-0,124	2,577	17,614	7,5016	2,9663	12,665	8,2348	6,1088	737,240	-0,158	2,368	1,2484
500	5,439	31,949	27,059	14,302	209,88	-0,232	2,7734	14,984	6,6022	3,4349	13,88	9,6626	6,6468	886,020	-0,152	2,1562	1,3405

Πίνακας 5 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης για ρεύμα παλμού I=10A

T [μs]	R <sub>s</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
100	5,567	36,130	29,836	20,240	172,100	0,294	3,097	18,980	6,979	3,264	14,036	9,368	6,963	816,520	-0,009	2,389	1,276
300	7,8898	46,57	38,17	26,412	231,36	0,4343	2,9798	19,136	9,768	4,7106	20,91	13,392	10,912	781,720	0,1264	2,4238	1,9526
500	8,7588	47,168	40,314	26,066	260,9	0,3111	2,666	29,852	10,747	5,923	24,23	16,988	11,863	665,320	-0,039	2,31	2,4496

Πίνακας 6 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης για ρεύμα παλμού I=20A

T [μs]	R <sub>s</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
100	6,135	39,062	31,778	22,822	200,240	0,475	3,141	17,950	7,658	4,205	17,031	11,409	8,330	917,920	-0,078	2,099	1,553
300	8,8308	50,14	42,73	28,238	255,4	0,4305	2,9216	27,532	10,938	7,1562	28,332	21,49	14,311	781,620	-0,03	2,0966	2,8218
500	10,556	58,93	49,43	32,524	310,56	0,4093	2,7898	31,094	13,111	9,7394	39,186	29,22	20,321	634,500	-3E-04	2,2882	3,7224

Πίνακας 7 Μέσες τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης για ρεύμα παλμού I=30A

T [μs]	R <sub>s</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>DeIQ</sub>	R <sub>v</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>DeIQ</sub>
100	6,249	41,354	33,040	25,658	239,980	0,656	3,683	24,235	8,015	5,394	22,442	15,347	11,304	1037,860	0,015	2,161	1,979
300	9,529	55,776	45,512	31,448	285,04	0,4818	3,1	29,632	12,021	9,7272	37,246	28,466	19,151	741,920	6,4065	2,0974	3,6388
500	10,882	57,654	48,374	32,806	318,12	0,4846	3,3274	30,626	13,395	12,173	46,748	35,368	24,368	722,980	0,119	2,5104	4,5516

### III.3.1 ΑΠΛΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Στην συνέχεια θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε την κατάλληλη συνάρτηση που συνδέει:

α) στους 3 πρώτους πίνακες, (πίνακα 1, πίνακα 2 και πίνακα 3), όπου μεταβλητό είναι το ρεύμα  $I$ , τις τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης με το ρεύμα, δηλαδή την συνάρτηση  $y = f(x)$  όπου  $x = I$  το ρεύμα σαν ανεξάρτητη μεταβλητή και  $y$  οι παράμετροι τραχύτητας / κυμάτωσης.

β) Στους 4 δεύτερους πίνακες, (πίνακα 4, πίνακα 5, πίνακα 6 και πίνακα 7) όπου μεταβλητός είναι ο χρόνος  $T$ , τις παραμέτρους τραχύτητας και κυμάτωσης με τον χρόνο, δηλαδή πάλι μια συνάρτηση της μορφής  $y = f(x)$  όπου  $x = T$  ο χρόνος σαν ανεξάρτητη μεταβλητή και  $y =$  οι παράμετροι τραχύτητας / κυμάτωσης.

Στην έρευνα αυτή σημειώνουμε δύο πράγματα:

α) Περιορίζουμε την αναζήτηση σε έξι παραμέτρους τραχύτητας, τις  $R_a$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{delQ}$ ,  $R_{Sm}$ ,  $R_{SK}$ ,  $R_{ku}$  και τις αντίστοιχες έξι παραμέτρους κυμάτωσης, τις  $W_a$ ,  $W_{zDIN}$ ,  $W_{delQ}$ ,  $W_{Sm}$ ,  $W_{SK}$ ,  $W_{ku}$ .

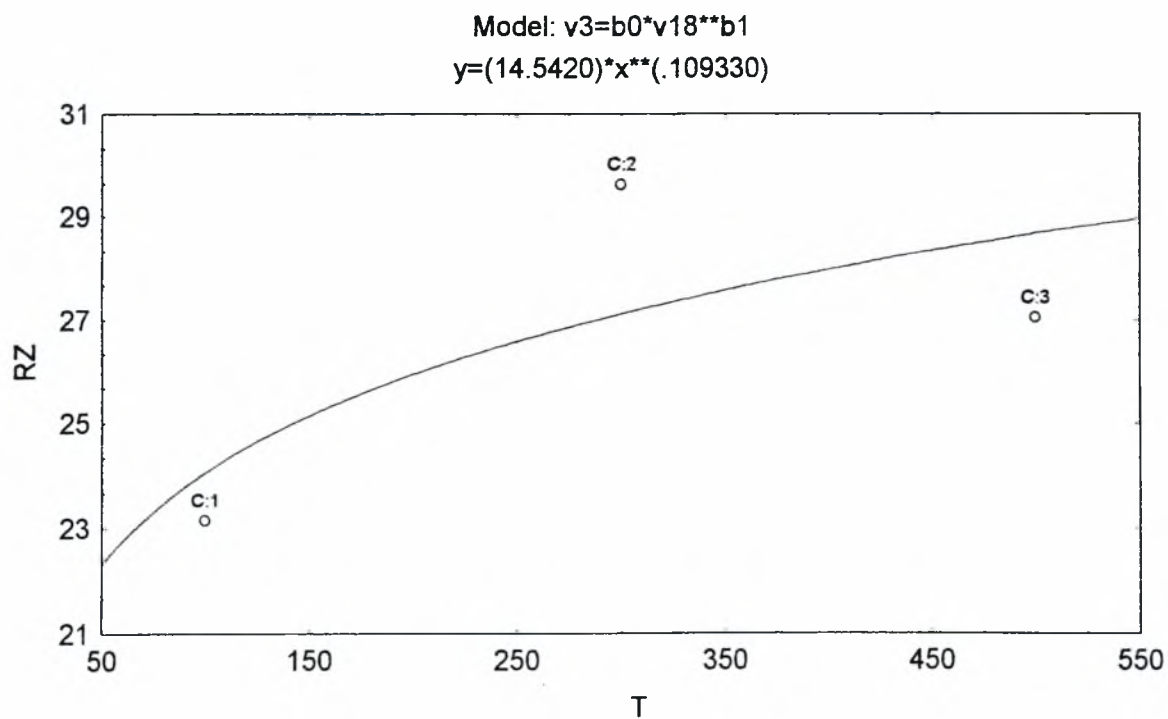
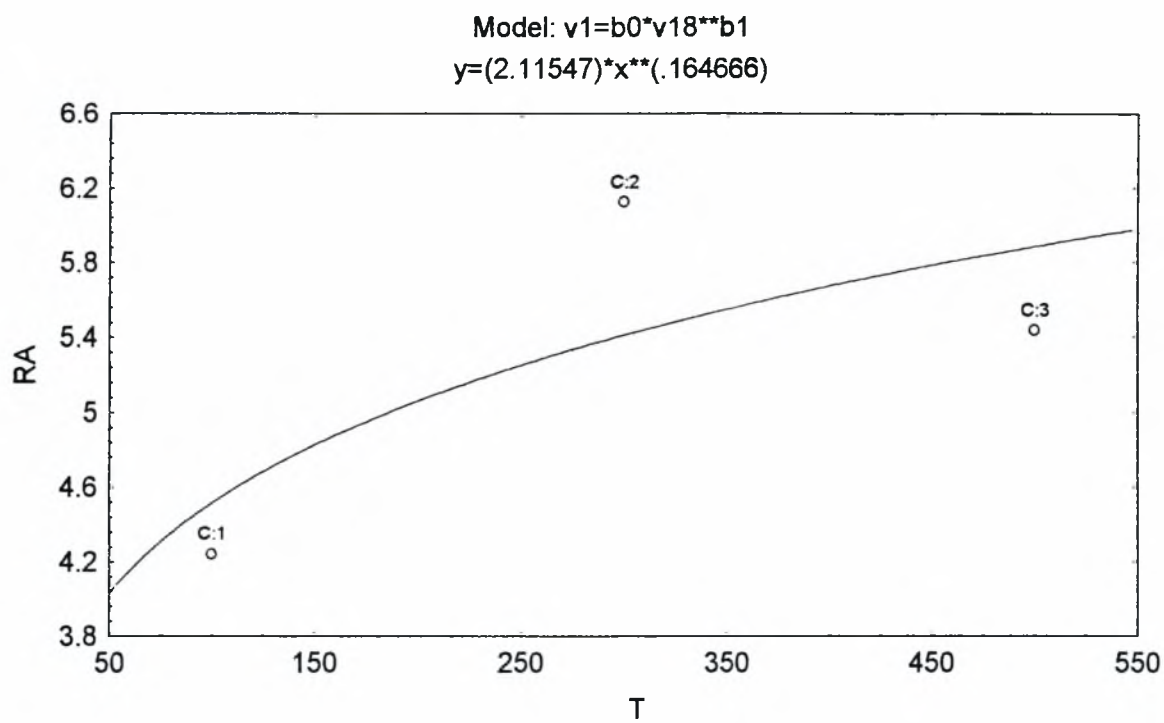
β) Η αναζήτηση της κατάλληλης συνάρτησης (regression model) που συνδέει τις παραμέτρους επιφανειακής τραχύτητας και κυμάτωσης με τον χρόνο και το ρεύμα θα γίνει μεταξύ των συναρτήσεων  $y = b_0 + b \cdot x$  (γραμμική),  $y = b_0 x^{b_1}$  (ύψωση σε δύναμη) και  $y = b_0 e^{b_1 x}$  (εκθετική). Η επιλογή γίνεται με βάση τον συντελεστή συσχέτισης  $r$ , ήτοι επιλέγεται η συνάρτηση με τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης ( $r \rightarrow 1$ )

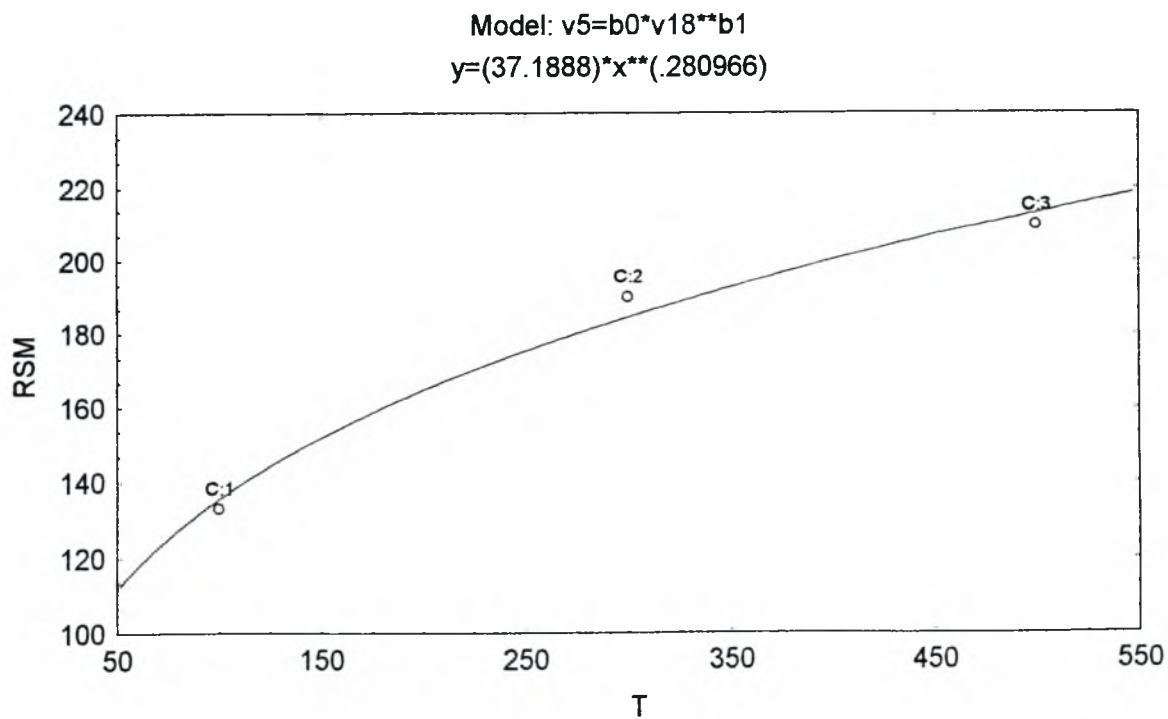
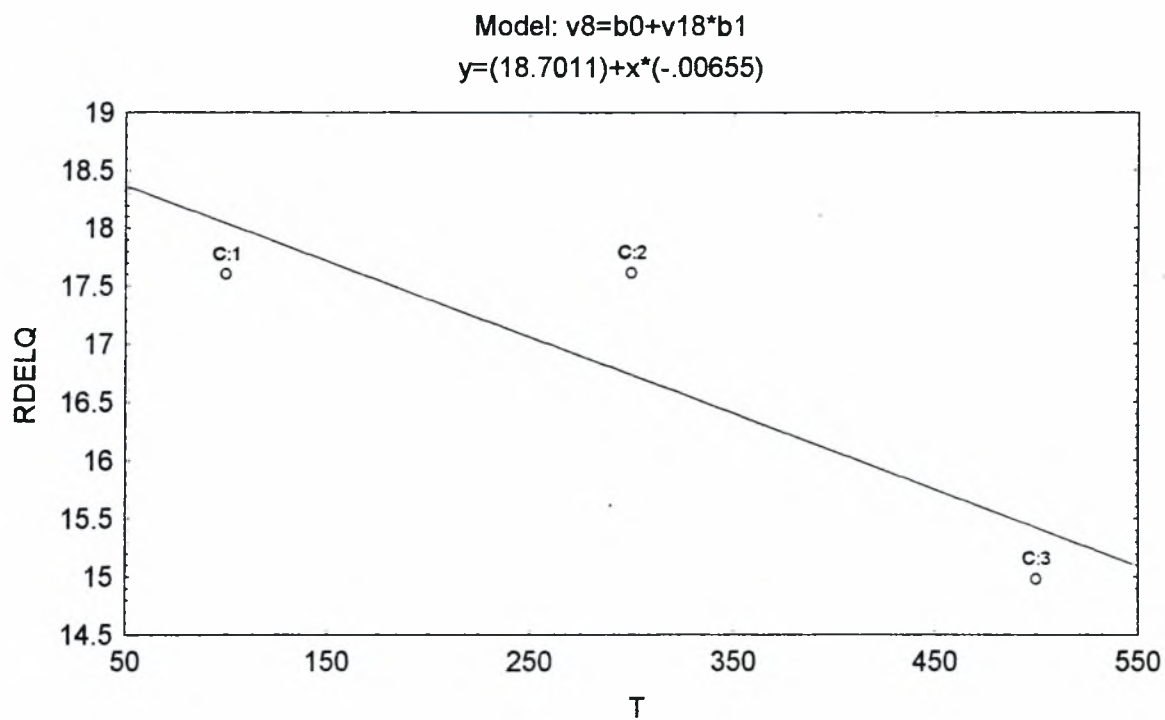
Στην συνέχεια δίδονται οι πίνακες A, B, C, D, E, F, G με τους συντελεστές  $b_0$  και  $b_1$ , την συσχέτιση, την κυριαρχούσα συνάρτηση καθώς και οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων αυτών (δηλαδή των  $R_a = f(T) \dots R_{ku} = f(T)$ ,  $W_a = f(T) \dots W_{ku} = f(T)$  και  $R_a = f(I) \dots R_{ku} = f(I)$ ,  $W_a = f(I) \dots W_{ku} = f(I)$ )

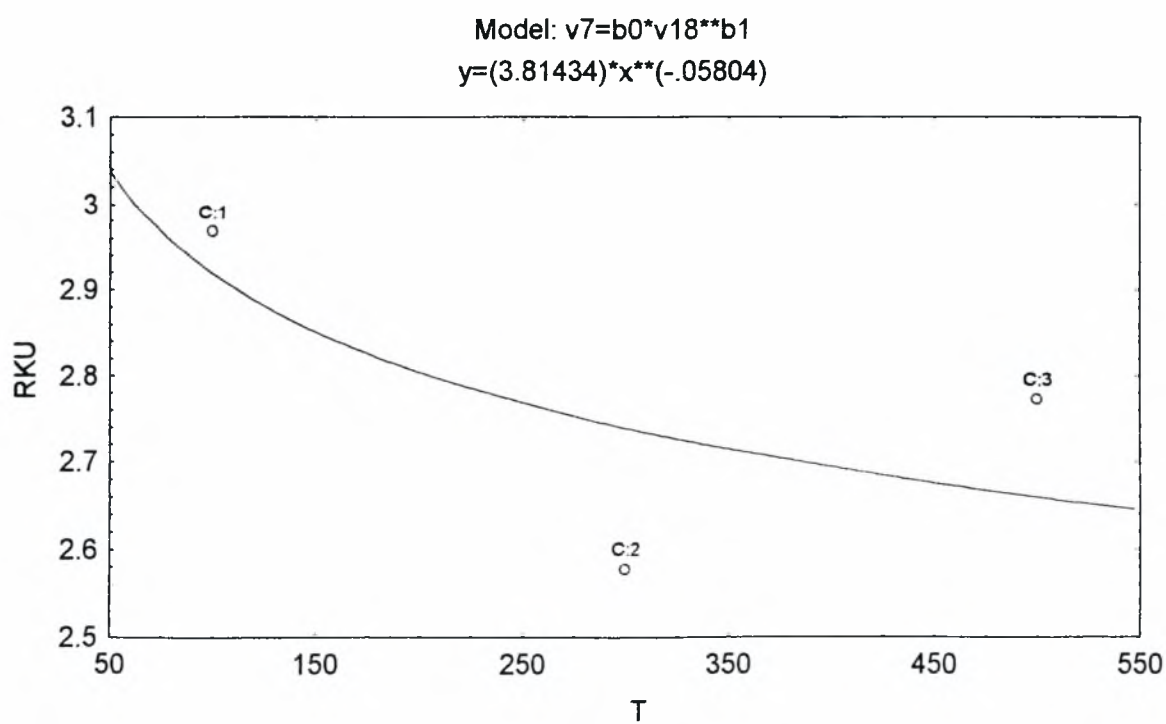
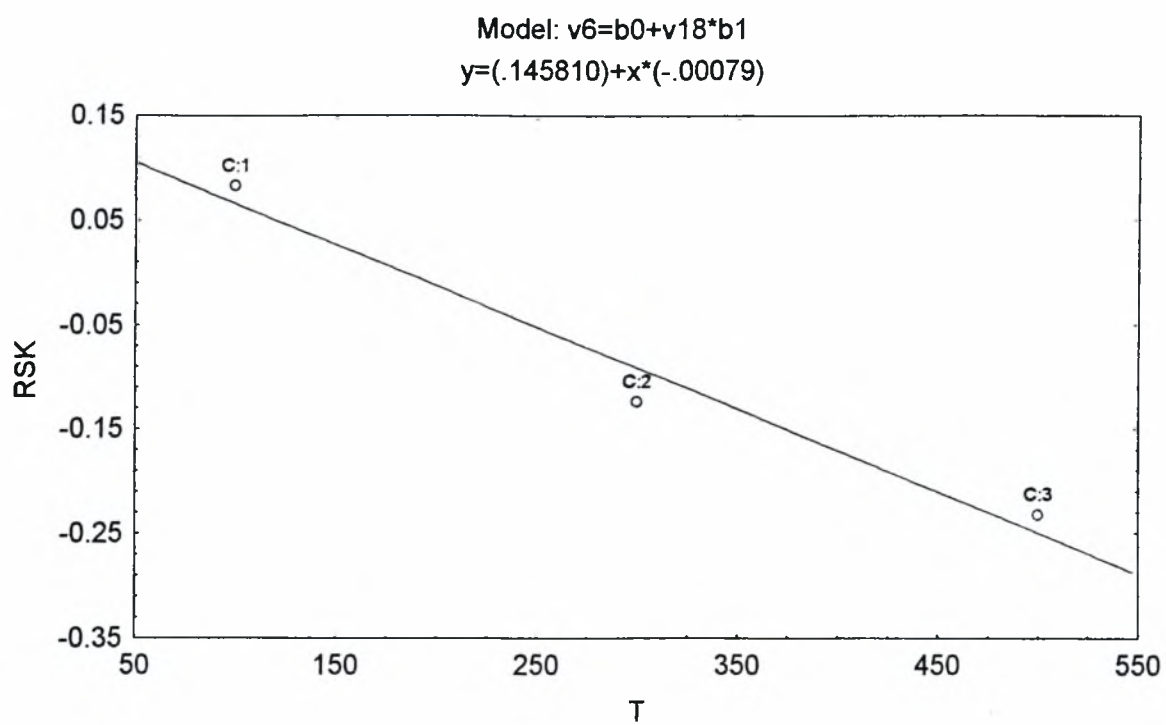
**Πίνακας Α** Συσχέτιση παραμέτρων με το χρόνο T για ρεύμα I=5A σταθερό

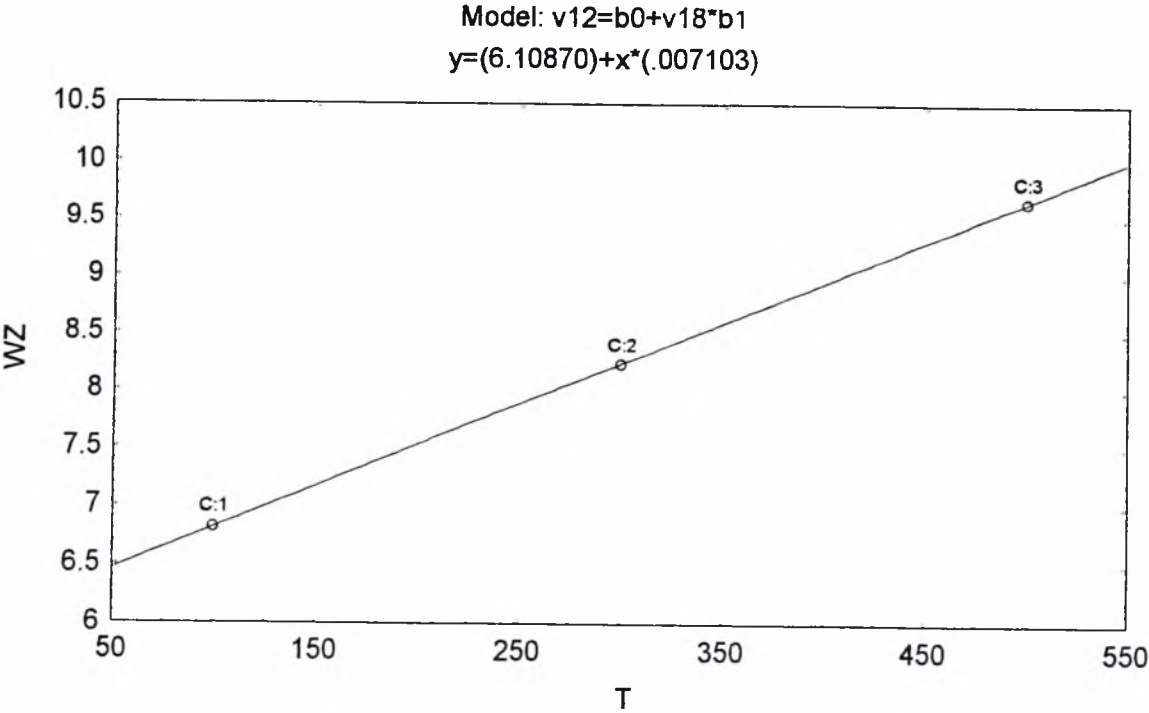
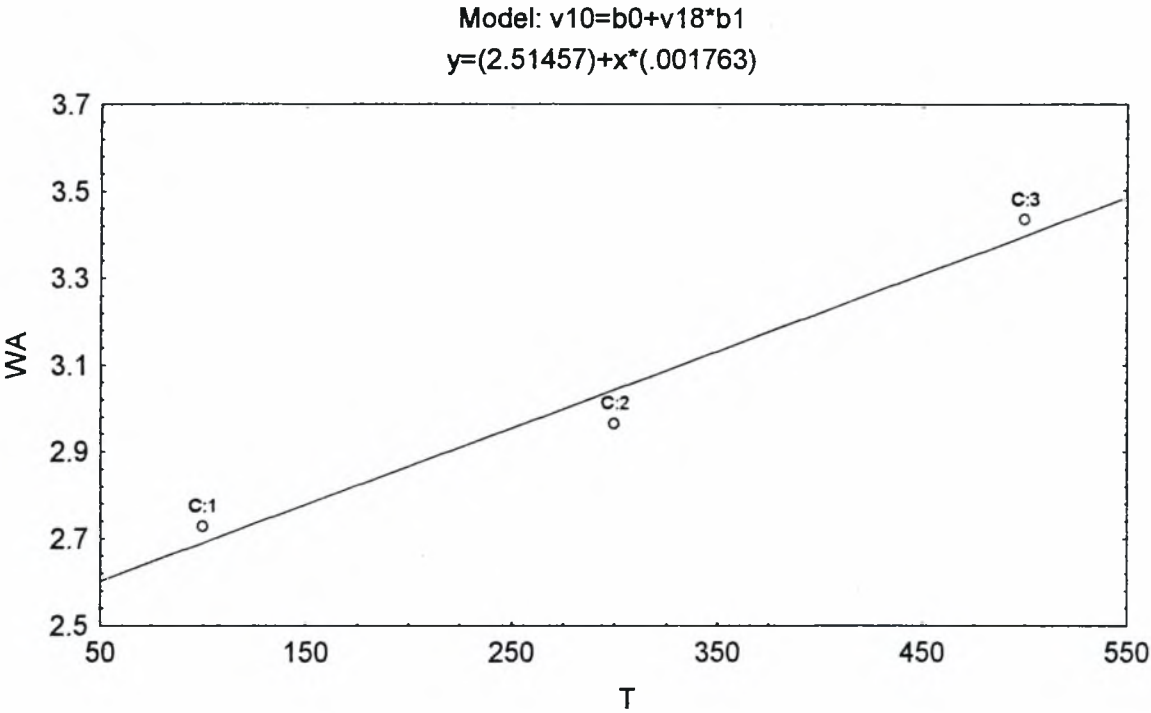
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	2,115	0,165	0,754	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v3	$R_{zDIN}$	14,542	0,109	0,735	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v8	$R_{DelQ}$	18,701	-0,007	0,865	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v5	$R_{Sm}$	37,189	0,281	0,992	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v6	$R_{sk}$	14,581	-0,001	0,984	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v7	$R_{ku}$	3,814	-0,058	0,674	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v10	$W_a$	2,515	0,002	0,983	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v12	$W_{zDIN}$	6,109	0,007	0,999	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v17	$W_{DelQ}$	0,407	0,194	0,995	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v14	$W_{Sm}$	2.753,360	-0,202	0,781	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v15	$W_{sk}$	0,096	-0,001	0,856	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v16	$W_{ku}$	1,952	0,023	0,323	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$



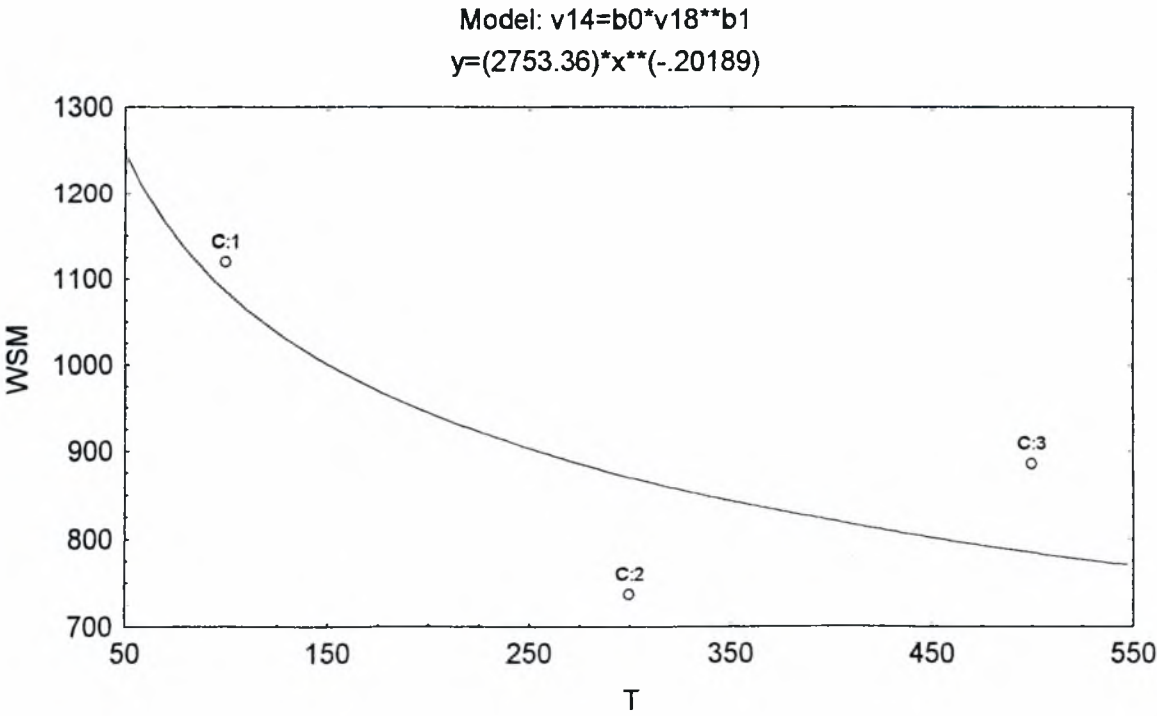
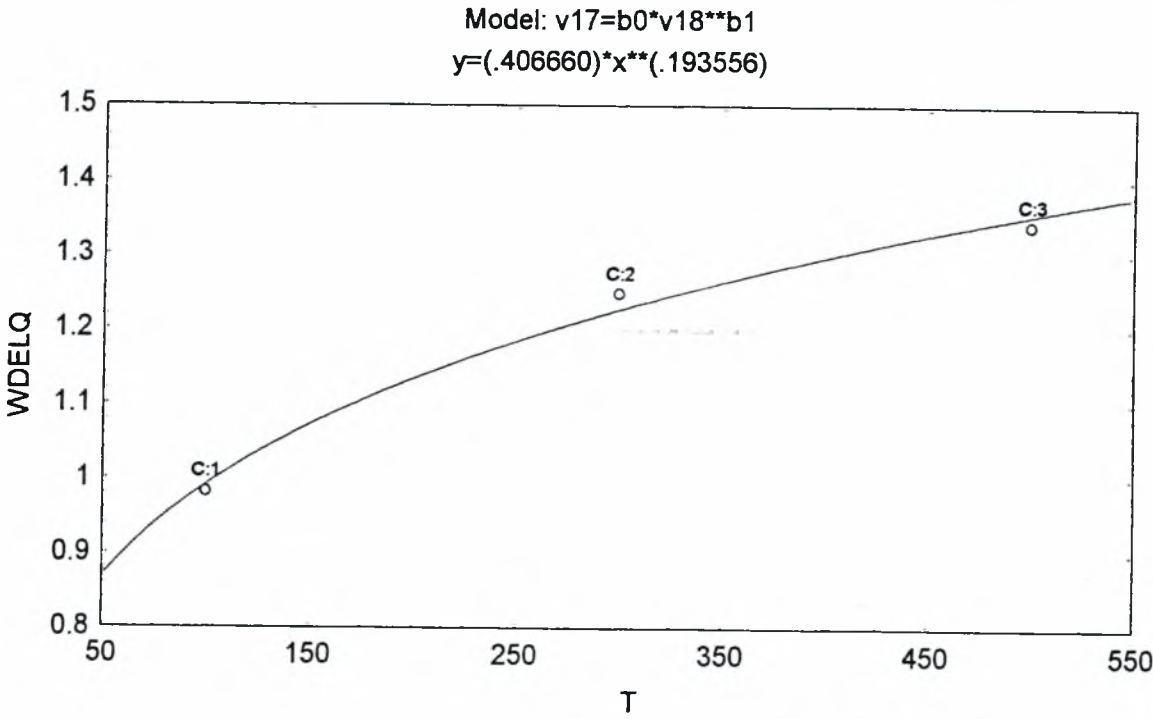


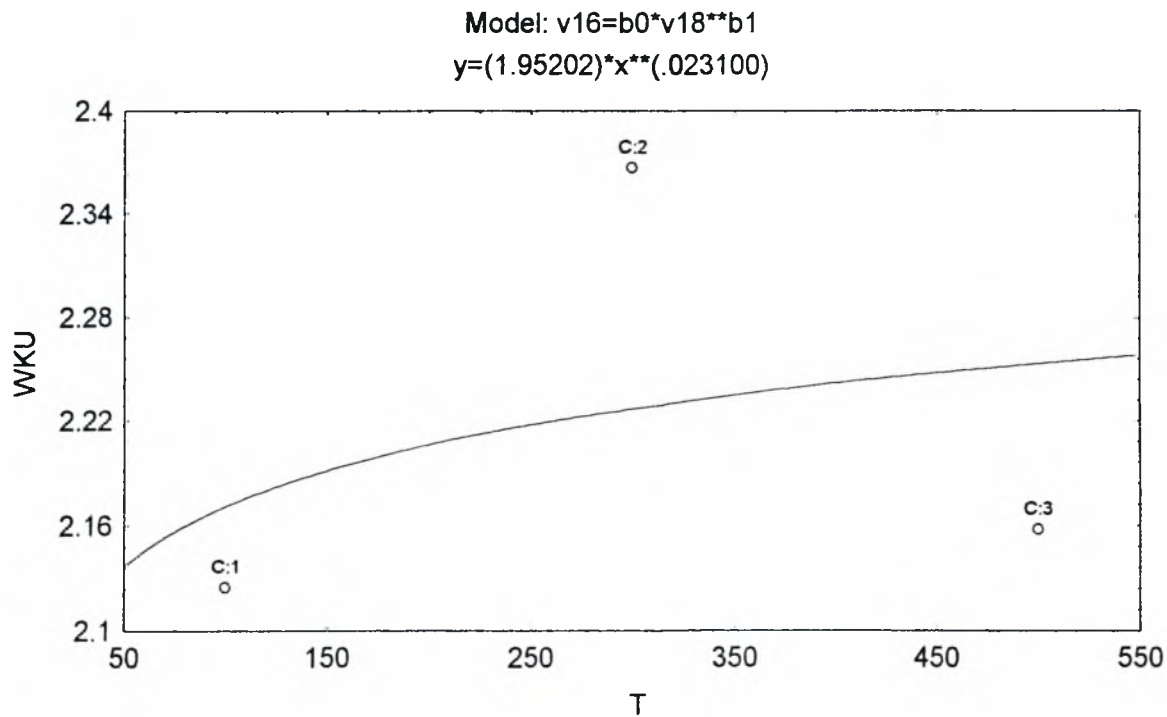
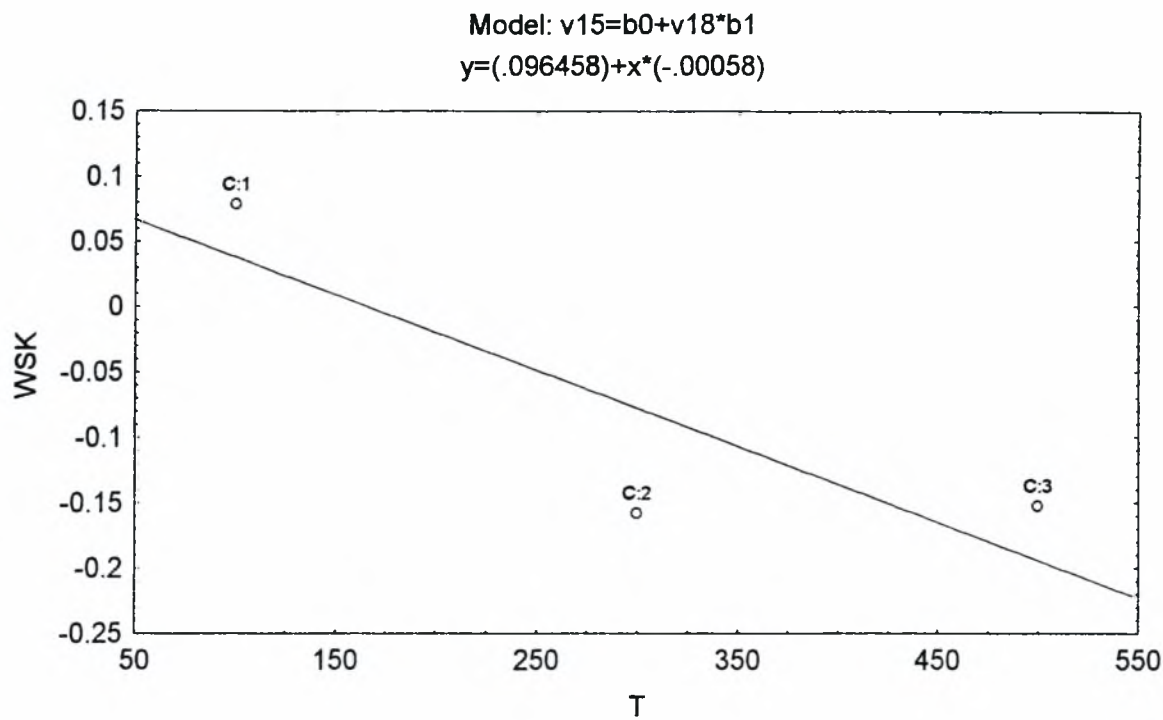






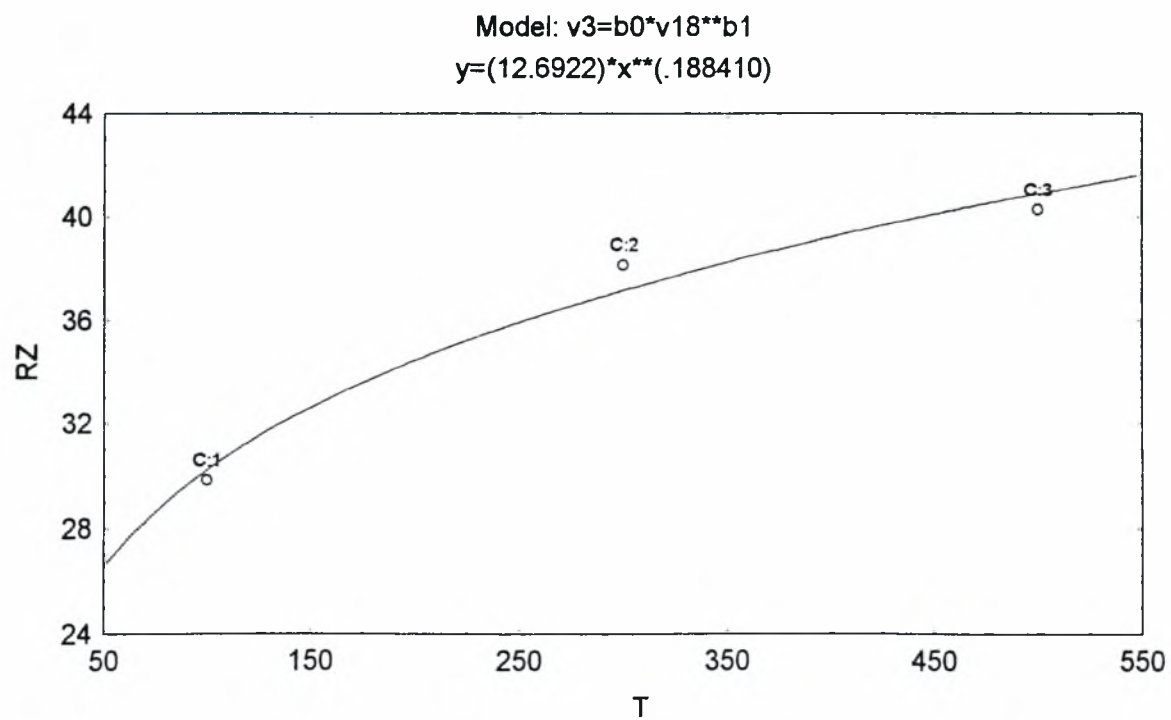
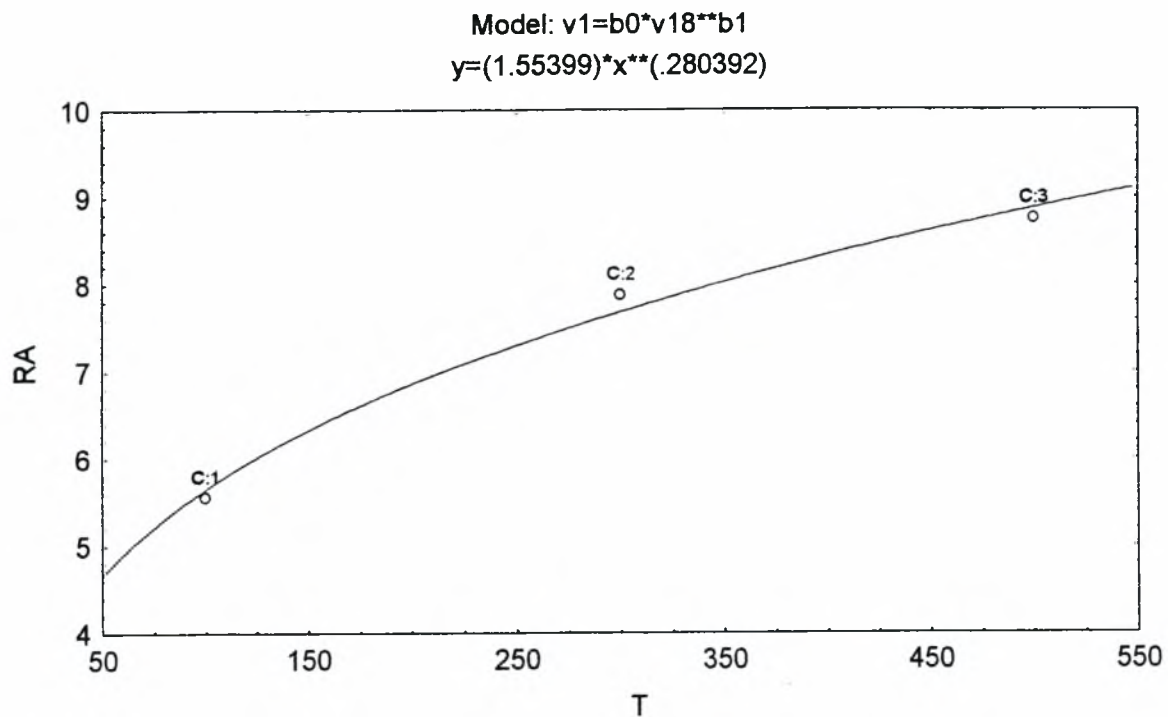




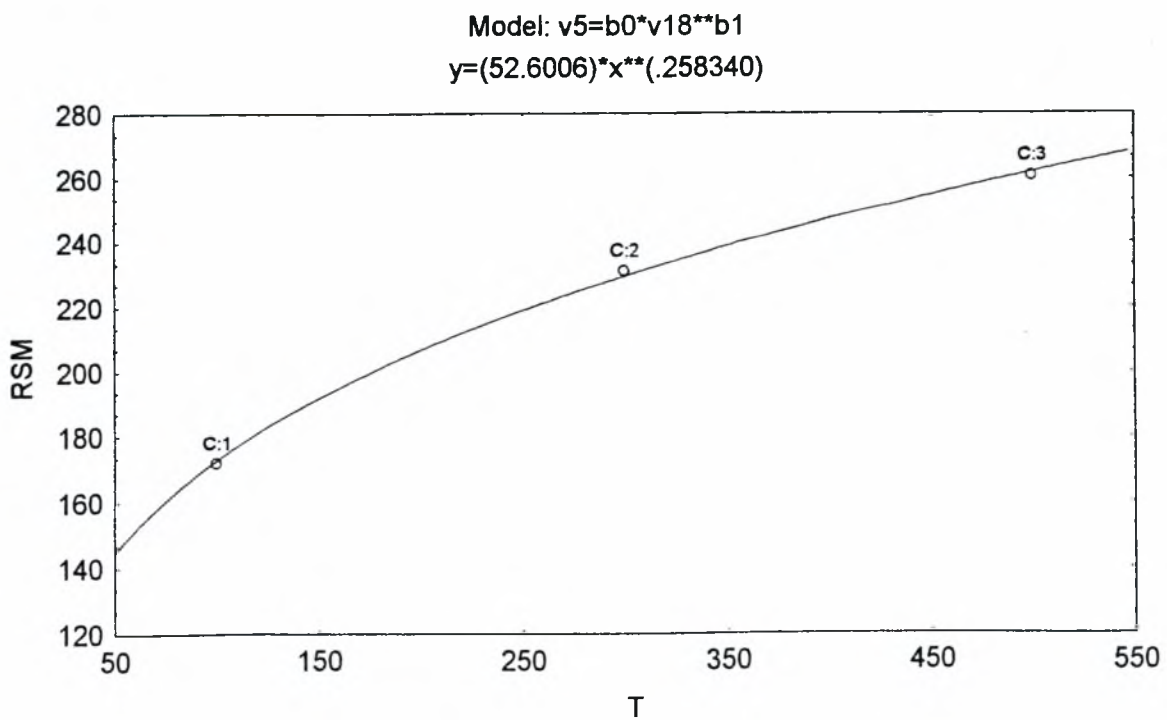
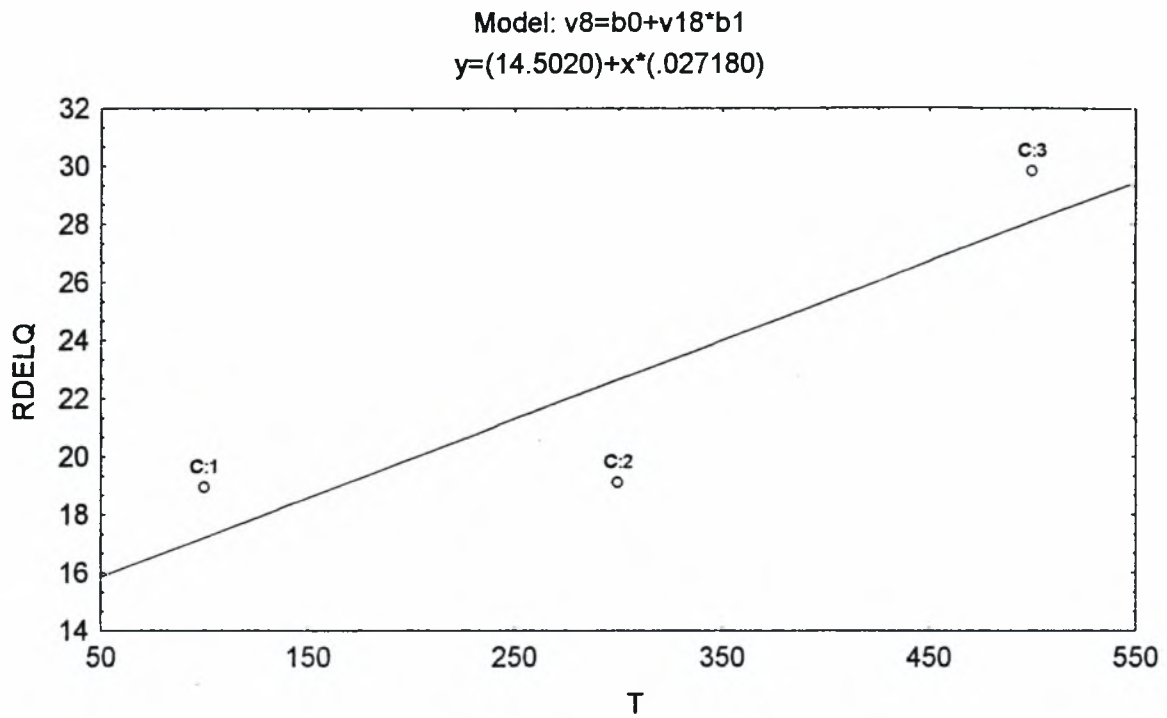


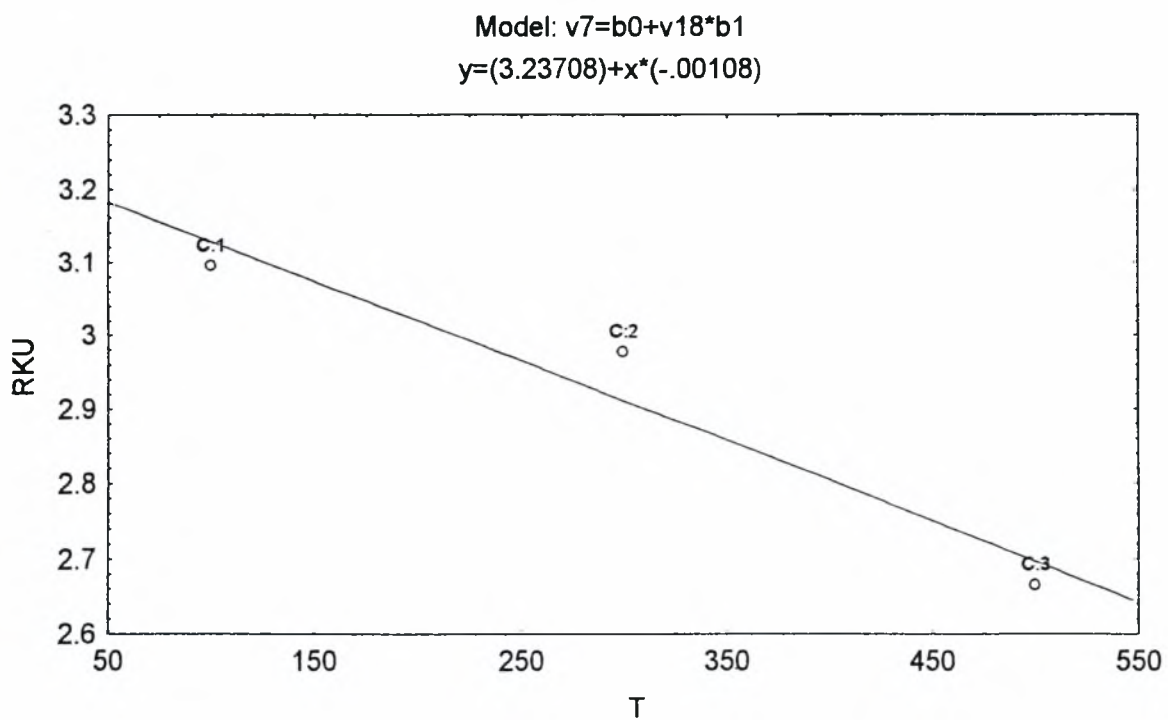
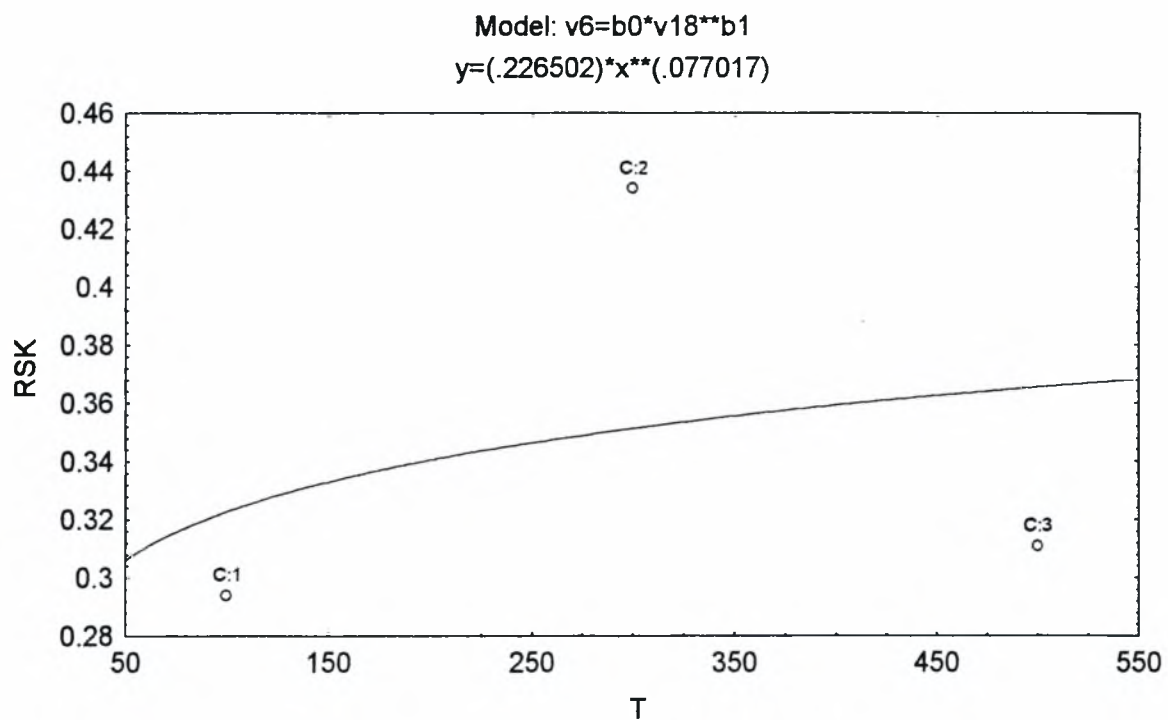
**Πίνακας Β** Συσχέτιση παραμέτρων με το χρόνο  $T$  για ρεύμα  $I=10A$  σταθερό

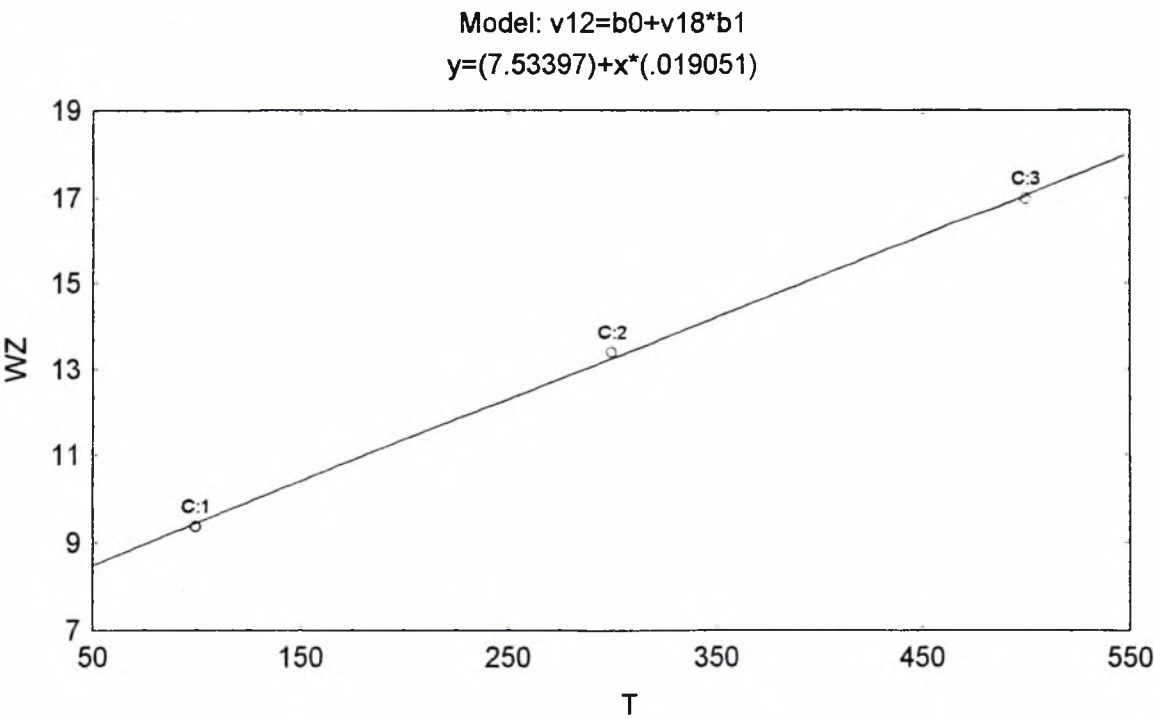
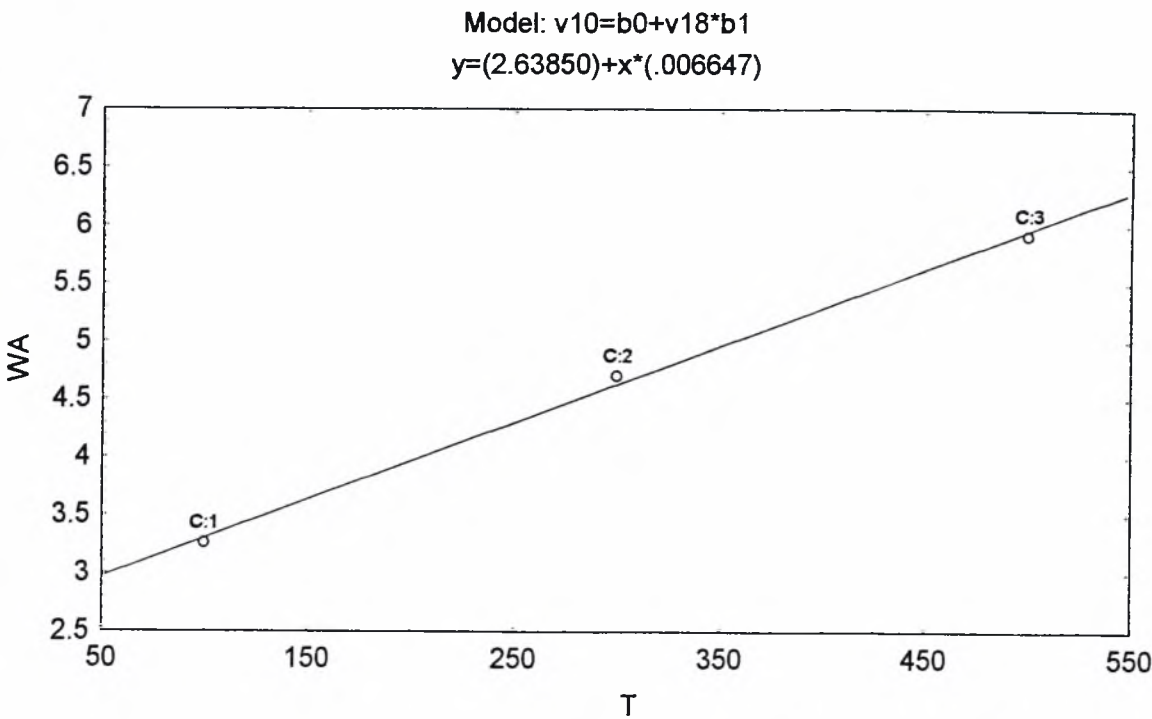
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	1,554	0,280	0,994	$y=b0*x^{b1}$
v3	$R_{zDIN}$	12,692	0,188	0,988	$y=b0*x^{b1}$
v8	$R_{DelQ}$	14,502	0,027	0,872	$y=b0+b1*x$
v5	$R_{Sm}$	52,601	0,258	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v6	$R_{sk}$	0,227	0,077	0,298	$y=b0*x^{b1}$
v7	$R_{ku}$	3,237	-0,001	0,967	$y=b0+b1*x$
v10	$W_a$	2,639	0,007	0,999	$y=b0+b1*x$
v12	$W_{zDIN}$	7,534	0,019	0,999	$y=b0+b1*x$
v17	$W_{DelQ}$	0,193	0,408	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v14	$W_{Sm}$	1.359,230	-0,107	0,863	$y=b0*x^{b1}$
v15	$W_{sk}$	0,049	0,000	0,174	$y=b0+b1*x$
v16	$W_{ku}$	2,433	0,000	0,676	$y=b0+b1*x$

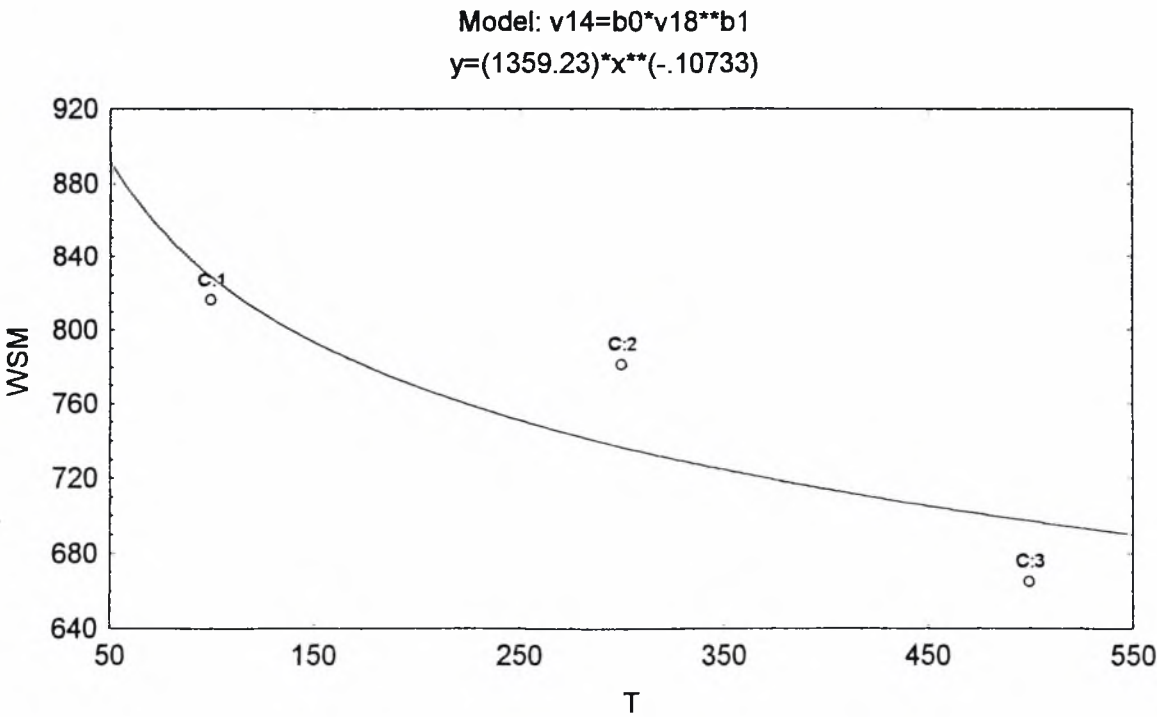
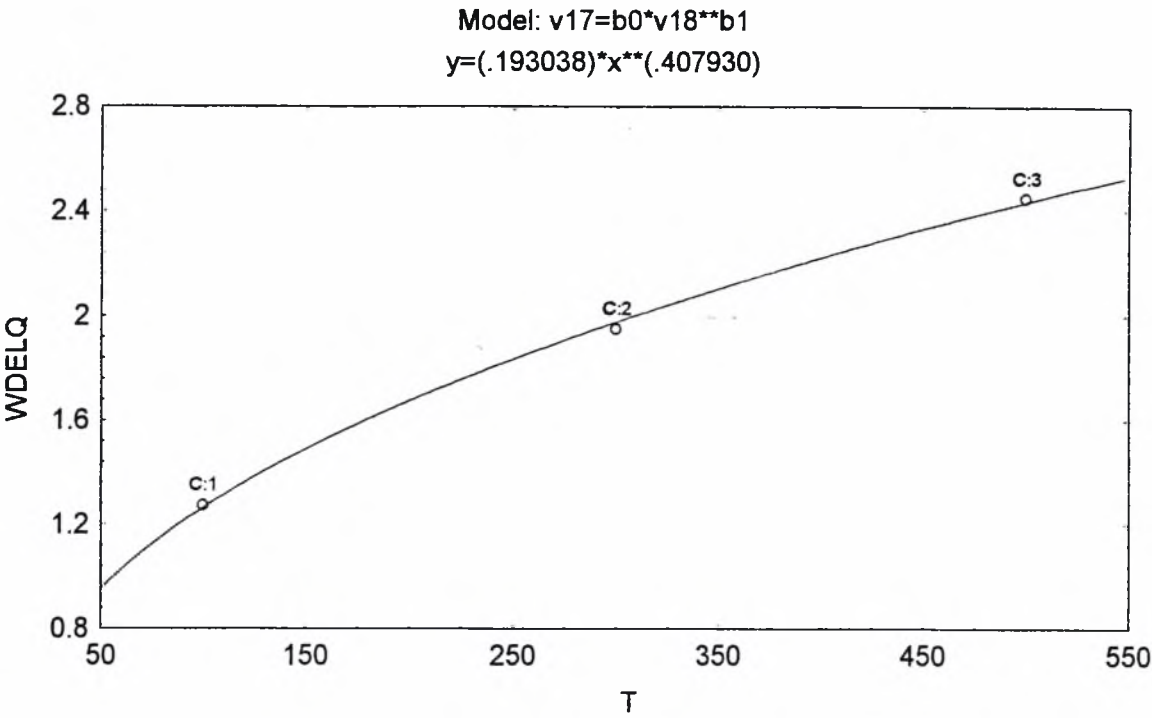




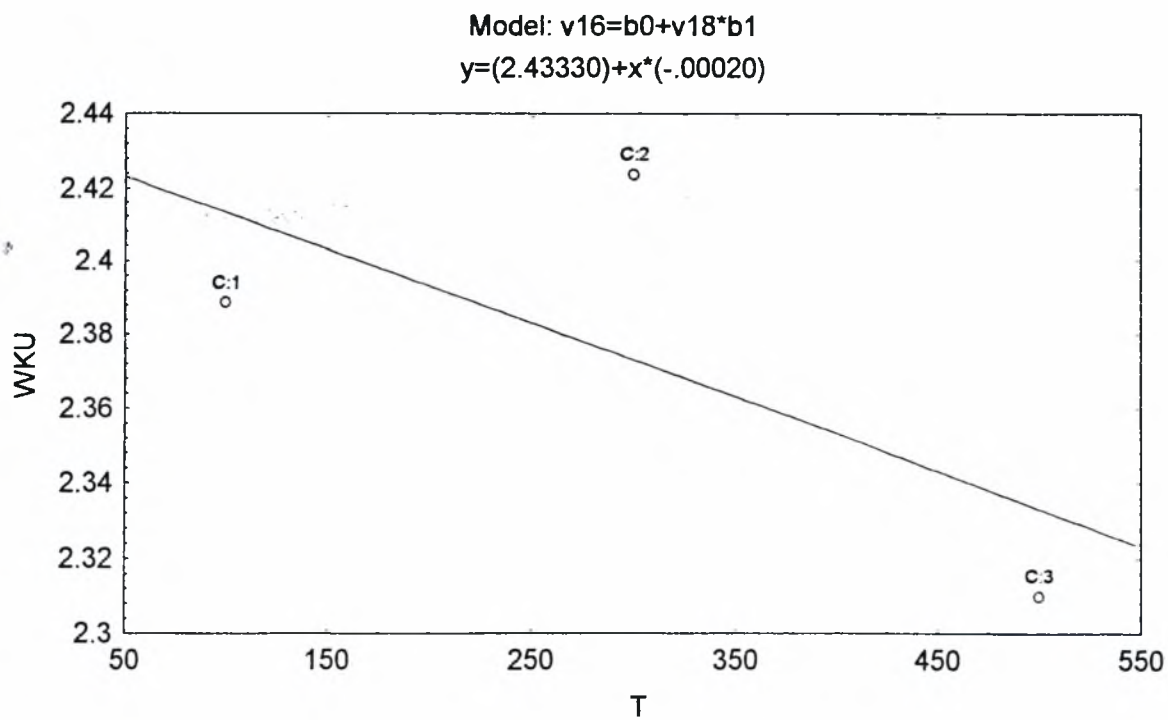
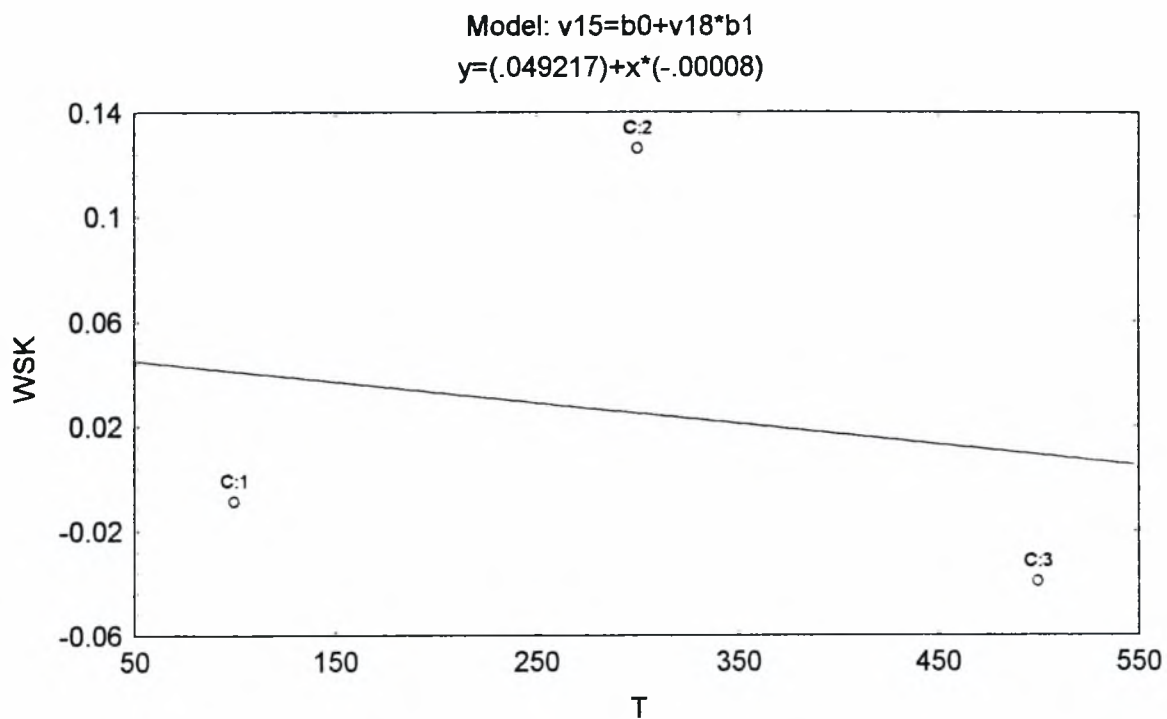






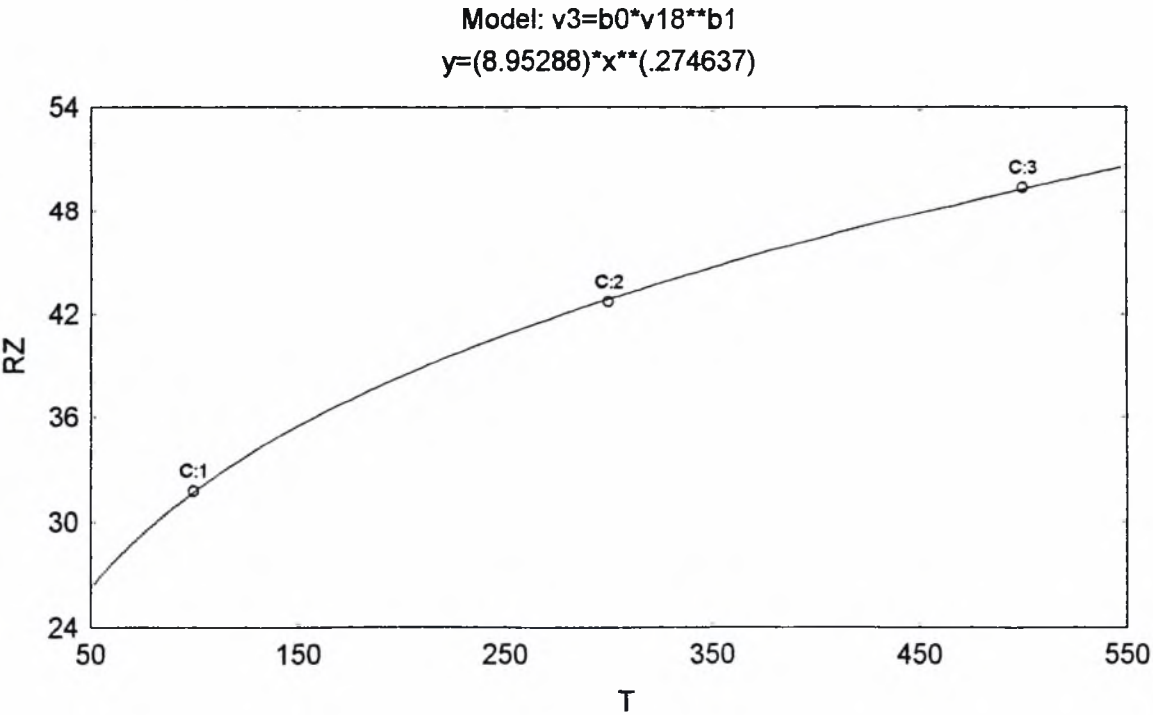
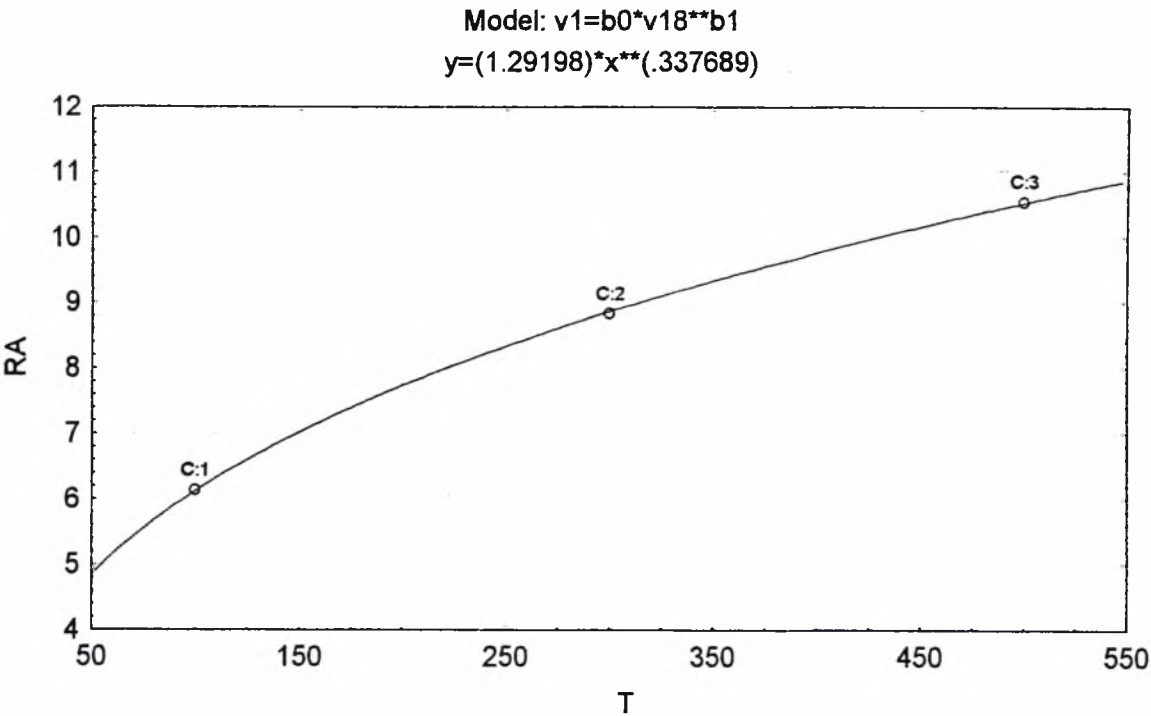


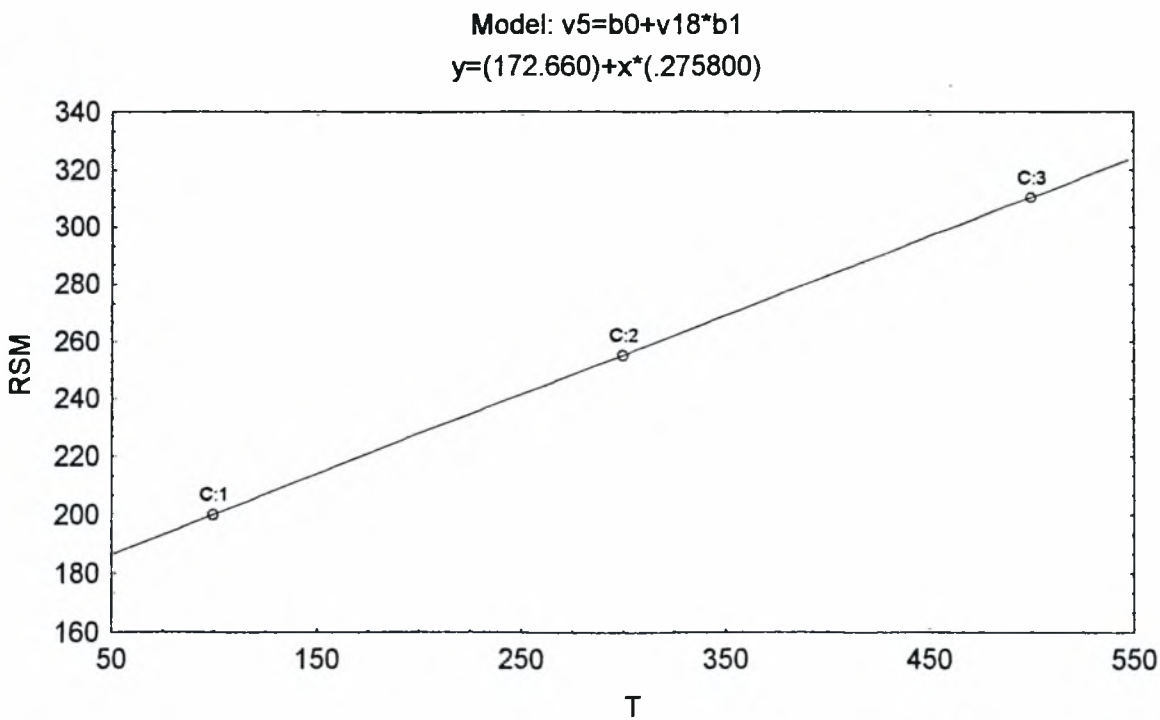
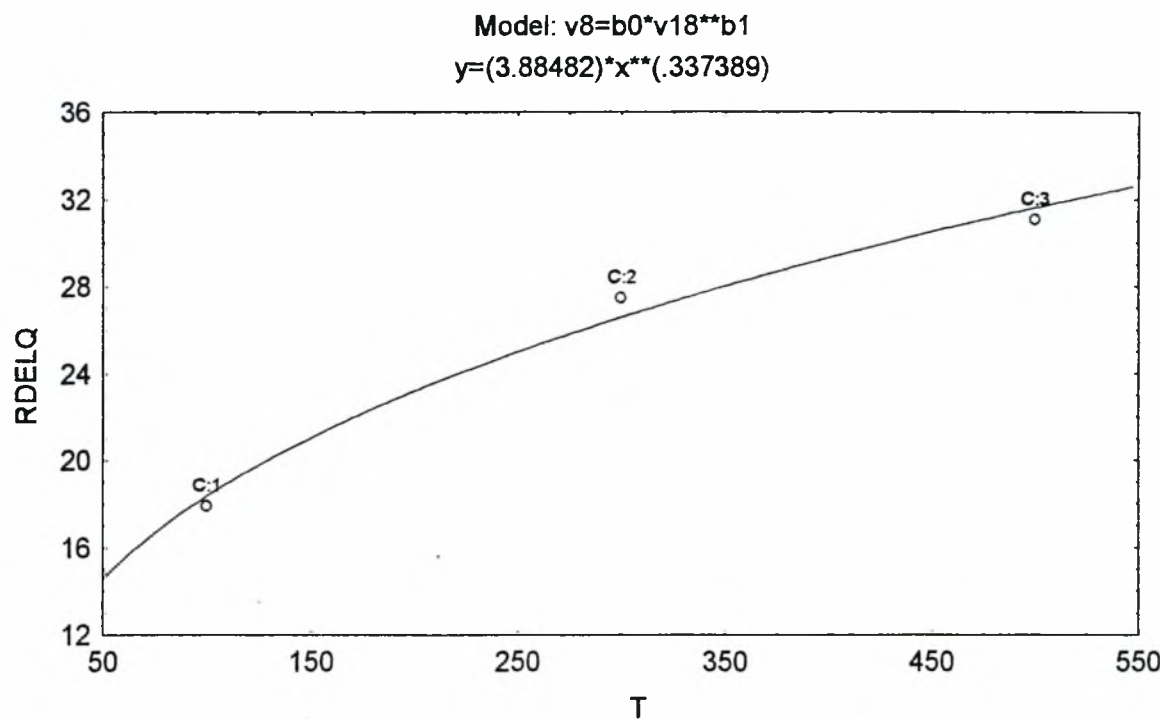




**Πίνακας C** Συσχέτιση παραμέτρων με το χρόνο T για ρεύμα I=20A σταθερό

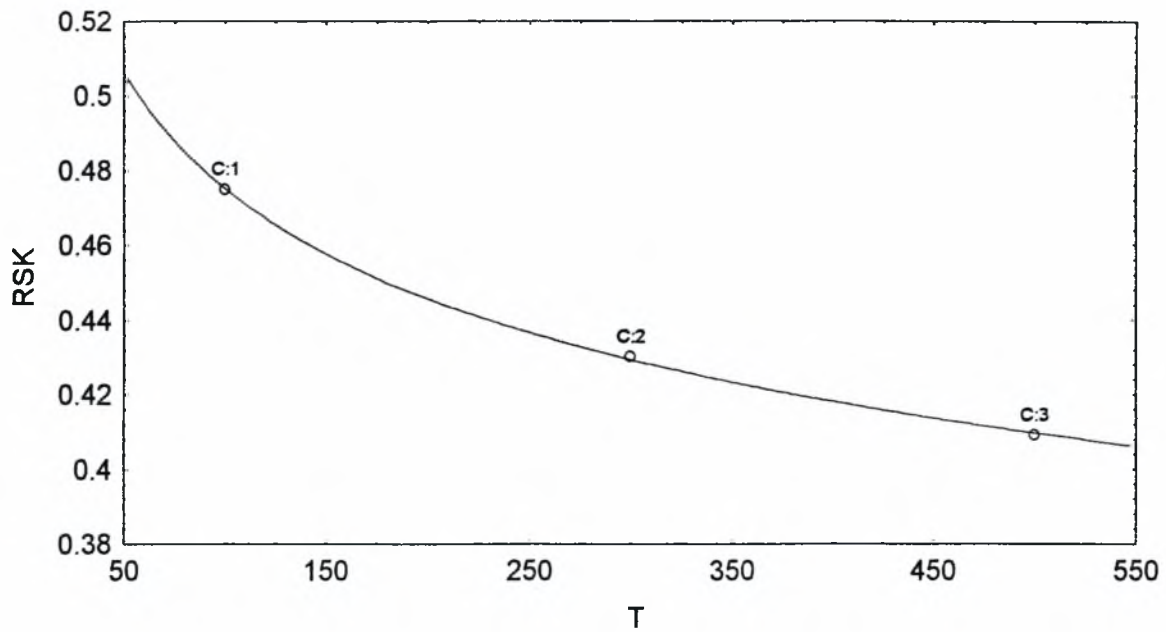
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	1,292	0,338	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v3	$R_{zDIN}$	8,953	0,275	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v8	$R_{DelQ}$	3,885	0,337	0,993	$y=b0*x^{b1}$
v5	$R_{Sm}$	172,660	0,276	0,999	$y=b0+b1*x$
v6	$R_{sk}$	0,727	-0,092	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v7	$R_{ku}$	4,385	-0,072	0,997	$y=b0*x^{b1}$
v10	$W_a$	2,882	0,014	0,999	$y=b0+b1*x$
v12	$W_{zDIN}$	0,760	0,587	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v17	$W_{DelQ}$	0,127	0,543	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v14	$W_{Sm}$	990,578	-0,709	0,999	$y=b0+b1*x$
v15	$W_{sk}$	-0,095	0,001	0,991	$y=b0+b1*x$
v16	$W_{ku}$	2,020	0,001	0,860	$y=b0+b1*x$



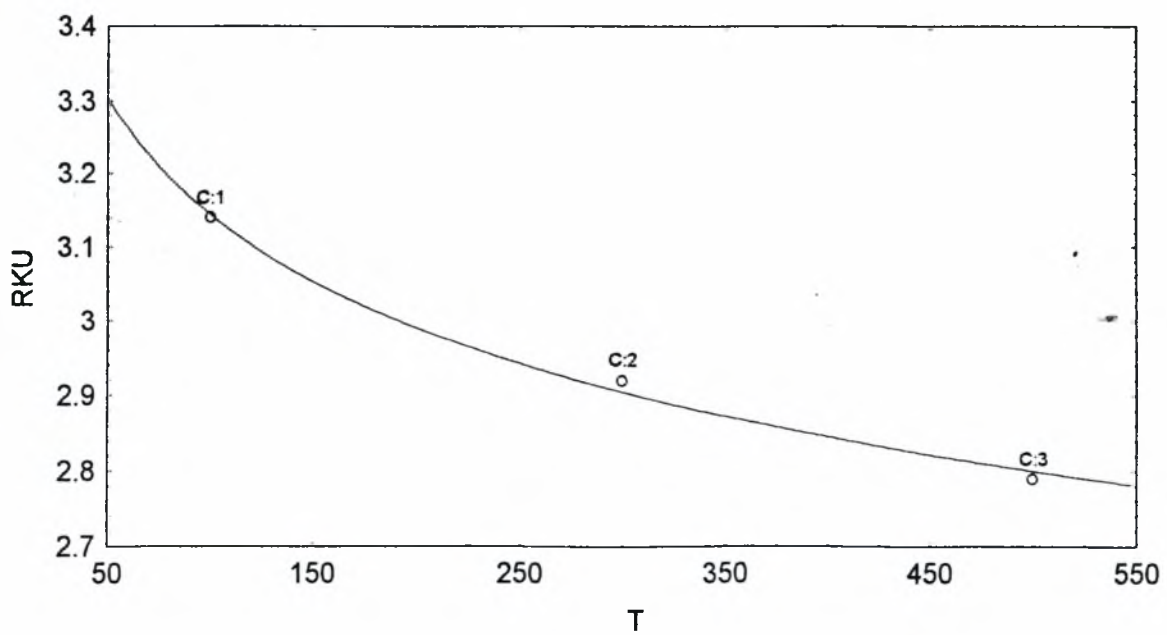


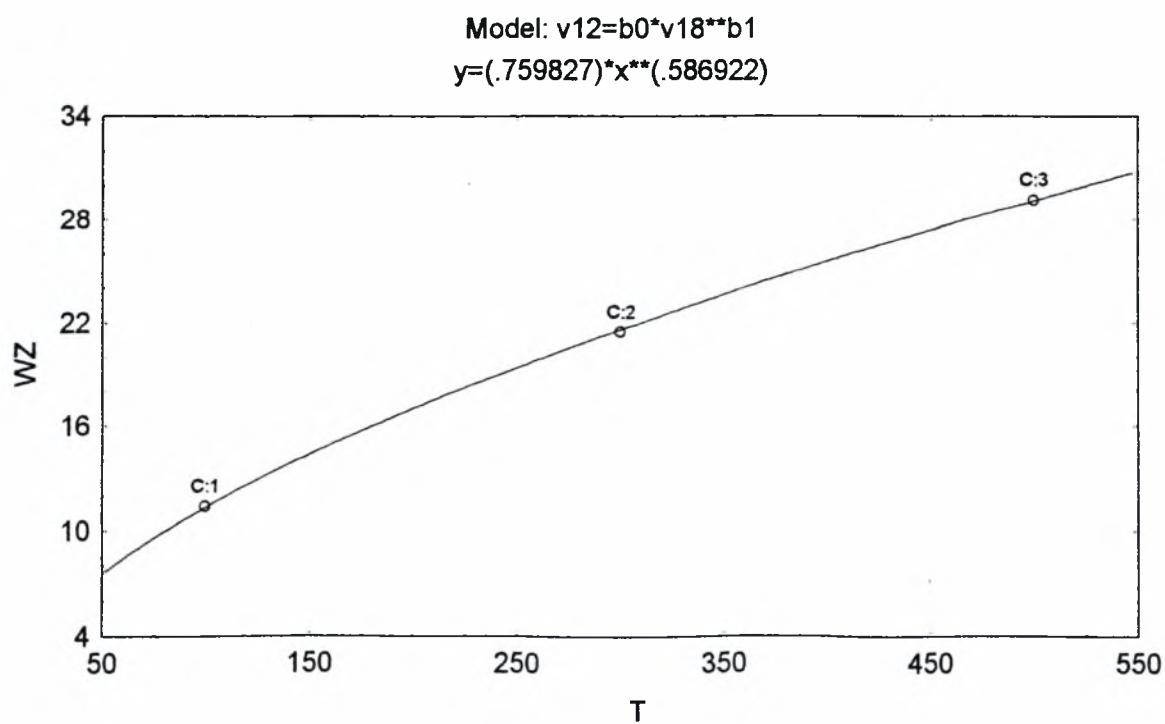
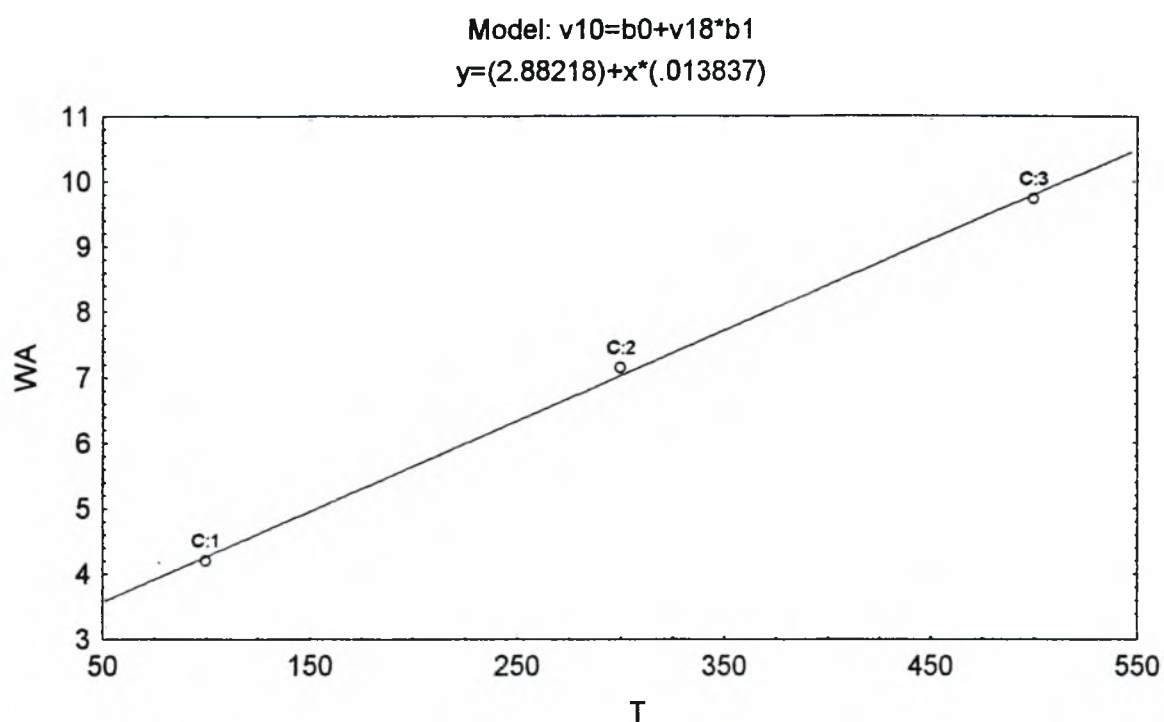


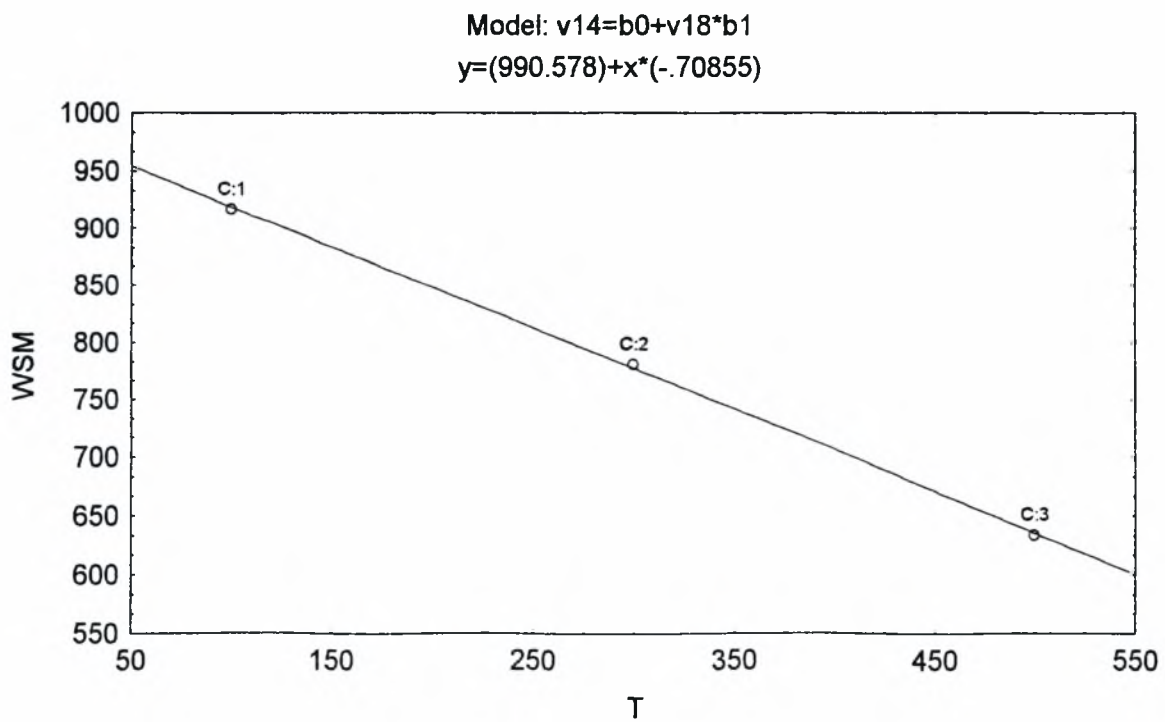
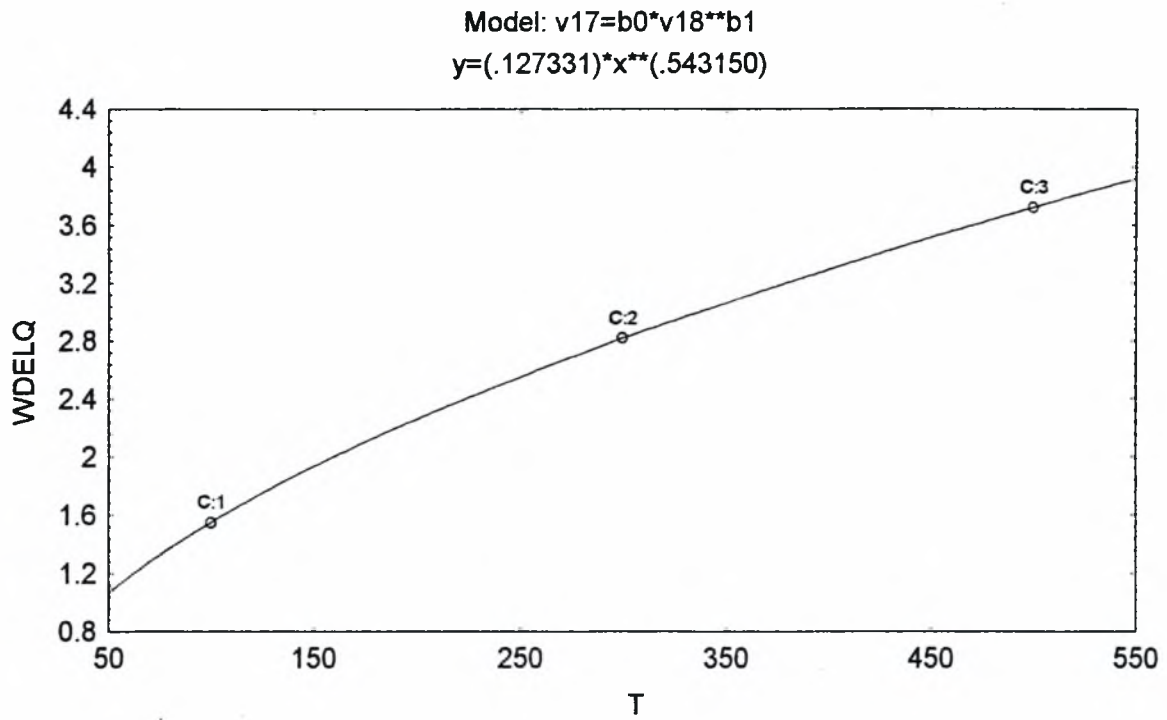
Model:  $v6=b0*v18^{**}b1$   
 $y=(.726681)*x^{**}(-.09213)$

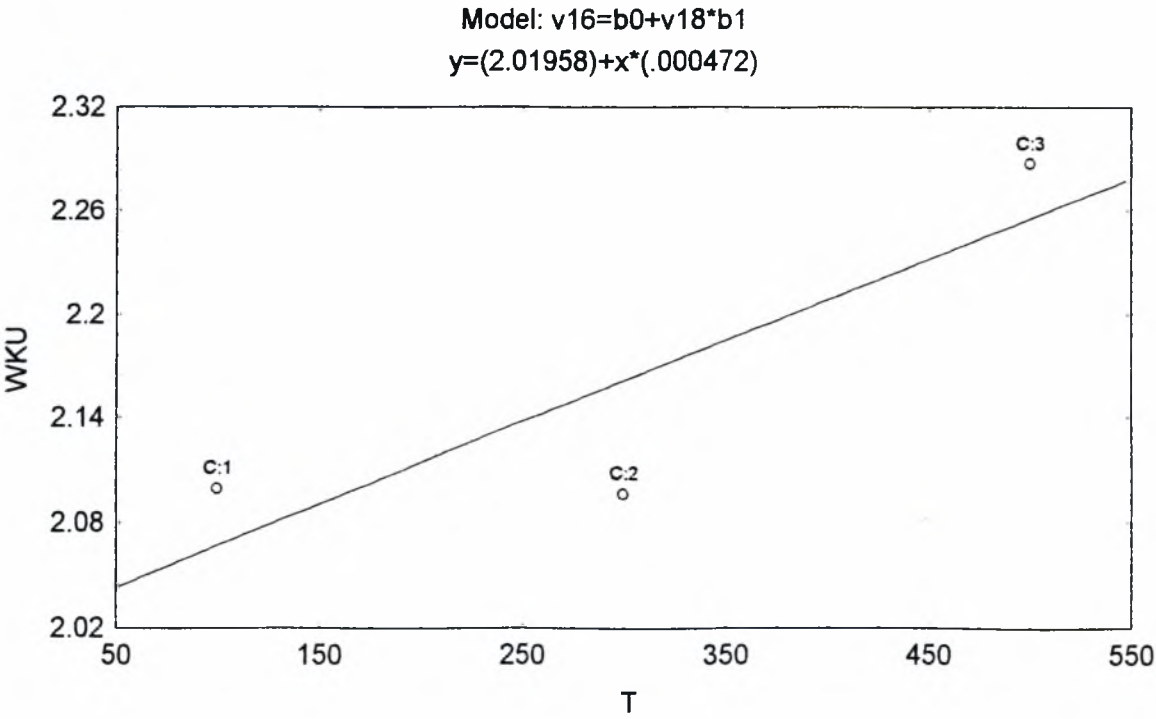
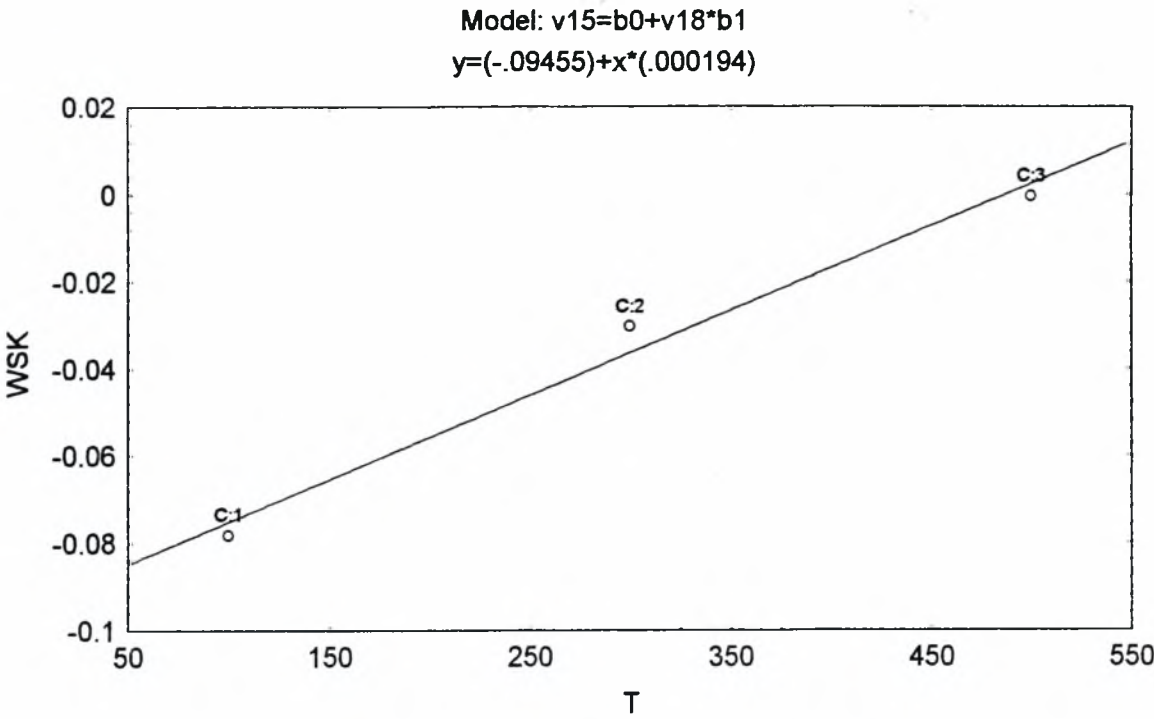


Model:  $v7=b0*v18^{**}b1$   
 $y=(4.38469)*x^{**}(-.07212)$





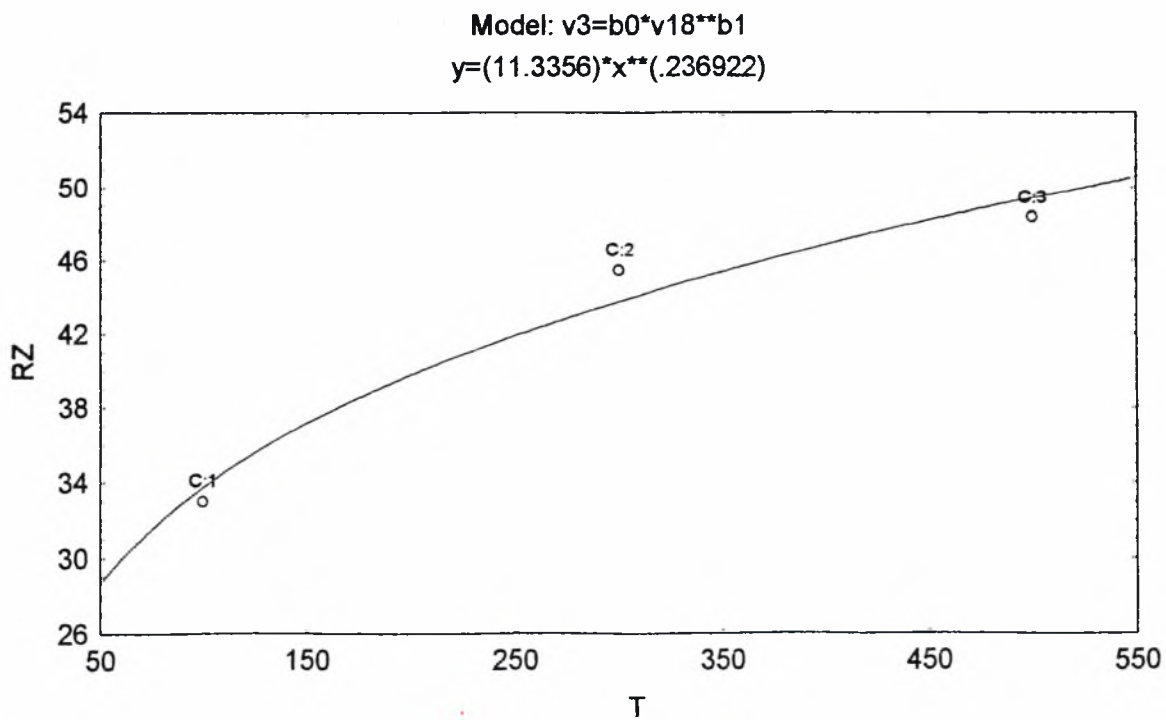
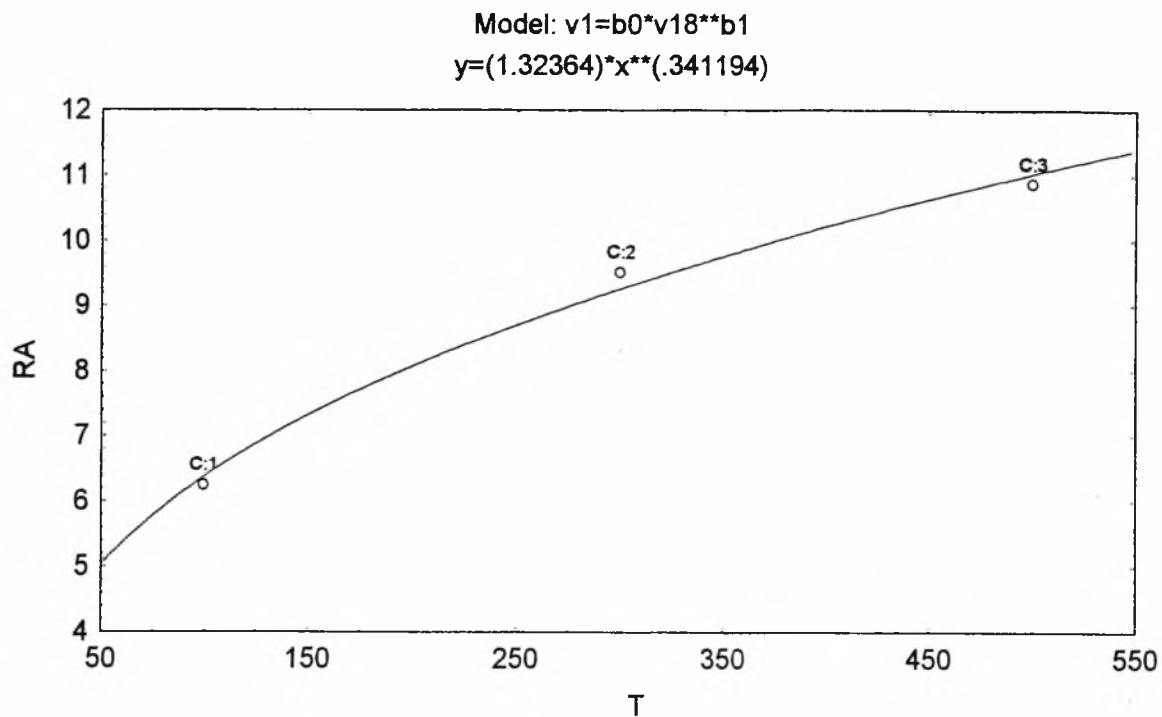


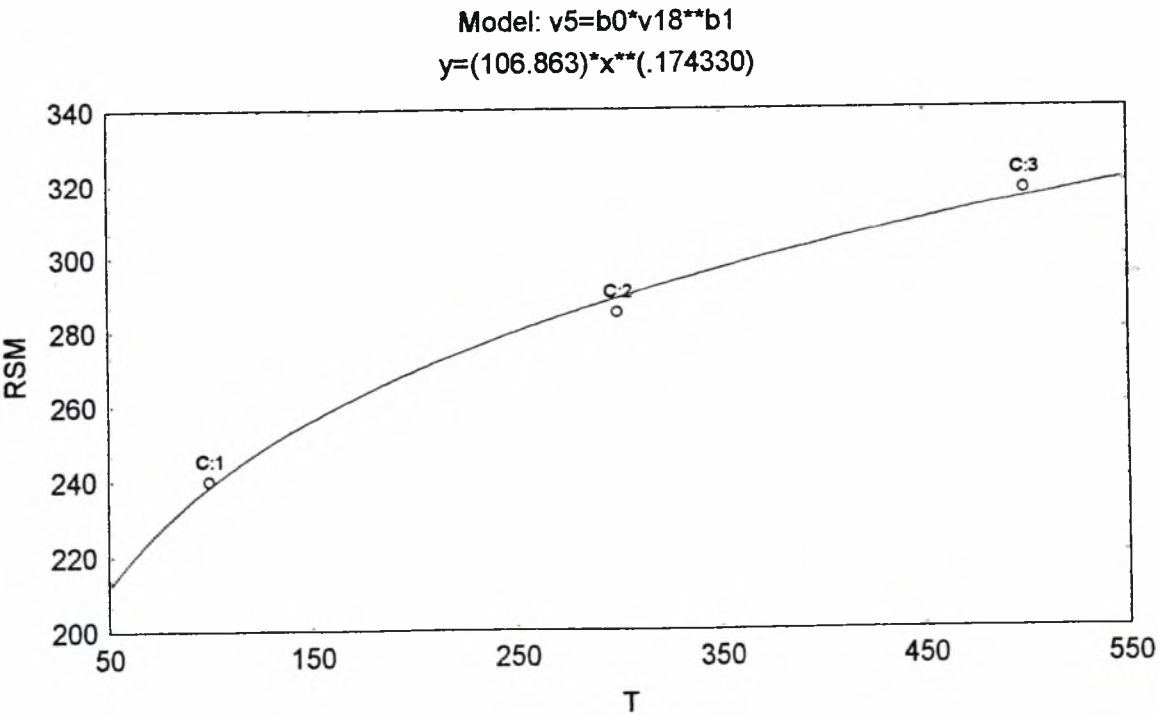
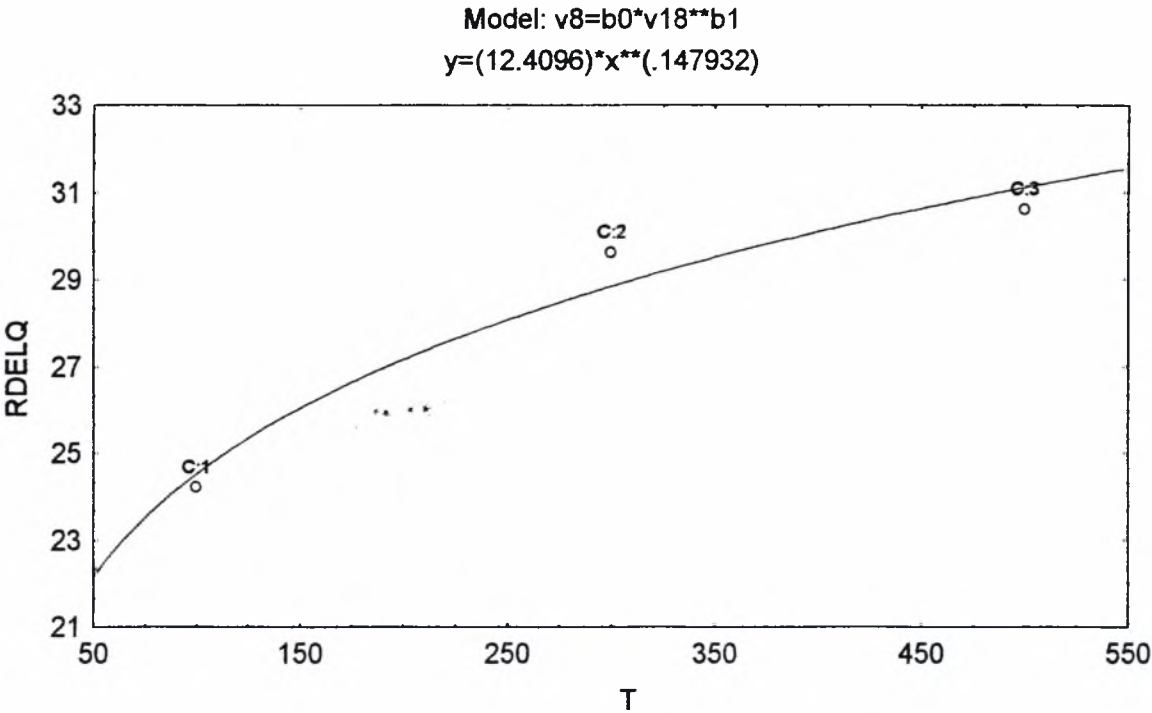


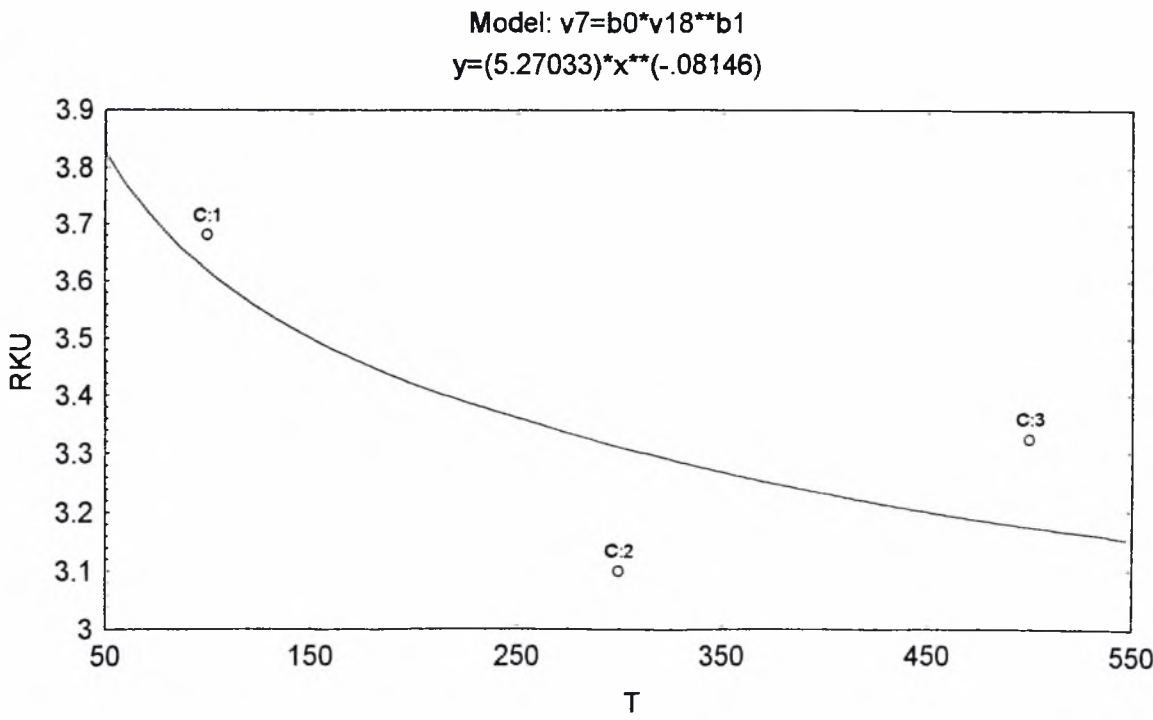
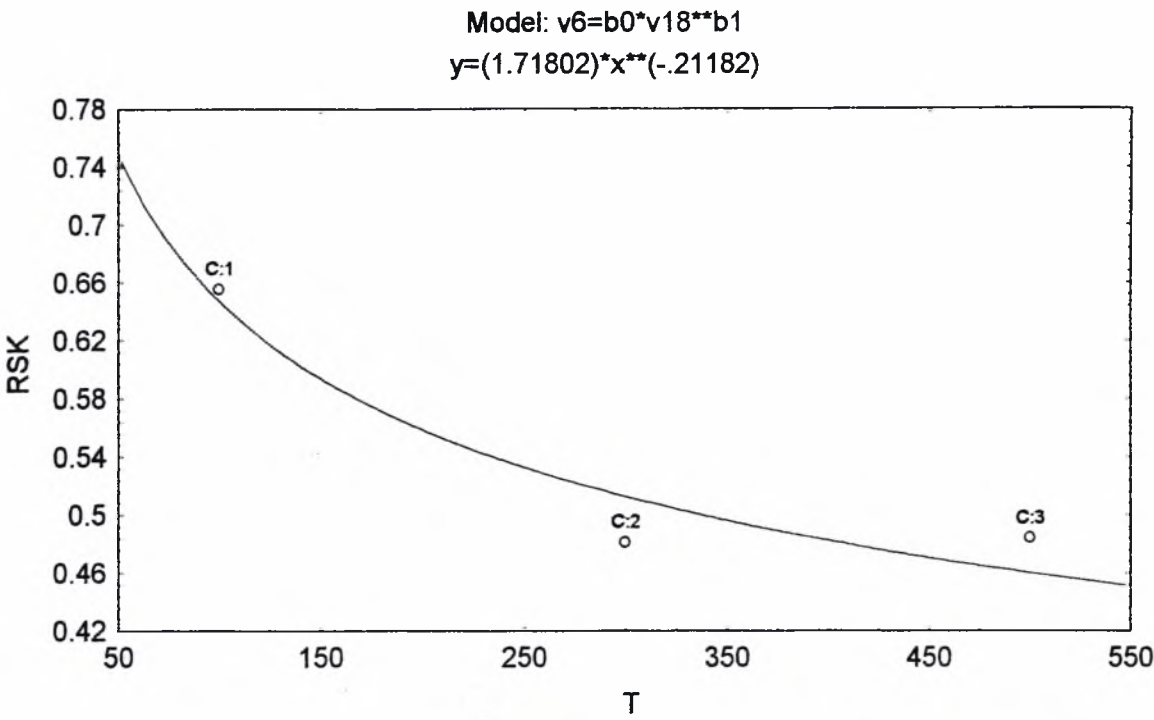


**Πίνακας D** Συσχέτιση παραμέτρων με το χρόνο T για ρεύμα I=30A σταθερό

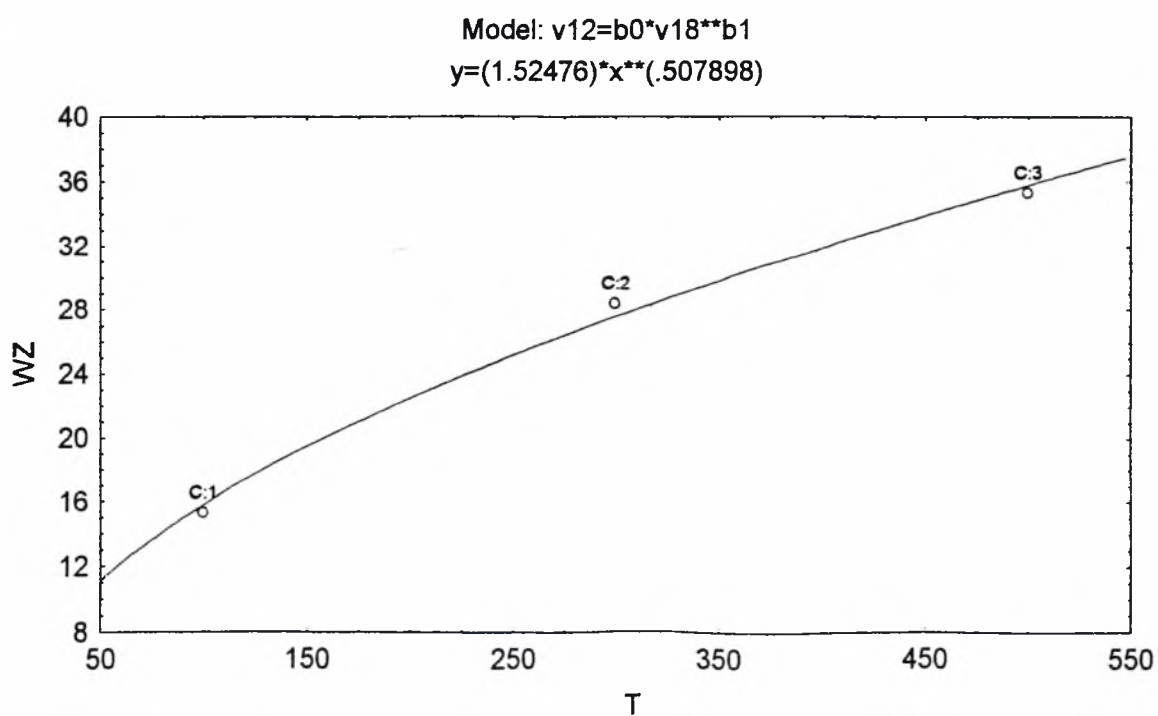
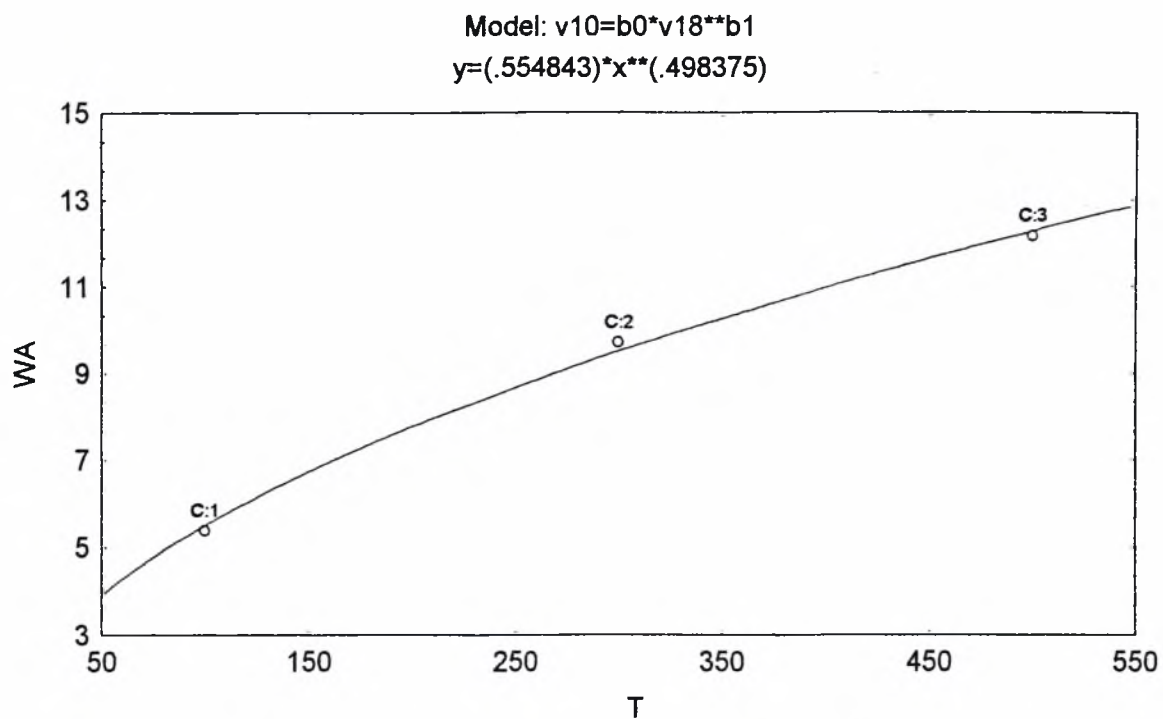
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	1,324	0,341	0,995	$y=b0*x^{b1}$
v3	$R_{zDIN}$	11,336	0,237	0,983	$y=b0*x^{b1}$
v8	$R_{DelQ}$	12,410	0,148	0,980	$y=b0*x^{b1}$
v5	$R_{Sm}$	106,863	0,174	0,996	$y=b0*x^{b1}$
v6	$R_{sk}$	1,718	-0,212	0,958	$y=b0*x^{b1}$
v7	$R_{ku}$	5,270	-0,081	0,766	$y=b0*x^{b1}$
v10	$W_a$	0,555	0,498	0,999	$y=b0*x^{b1}$
v12	$W_{zDIN}$	1,525	0,508	0,997	$y=b0*x^{b1}$
v17	$W_{DelQ}$	0,195	0,508	0,998	$y=b0*x^{b1}$
v14	$W_{Sm}$	3.204,530	-0,247	0,977	$y=b0*x^{b1}$
v15	$W_{sk}$	0,550	0,250	0,163	$y=b0*x^{b1}$
v16	$W_{ku}$	1,994	0,001	0,786	$y=b0+b1*x$

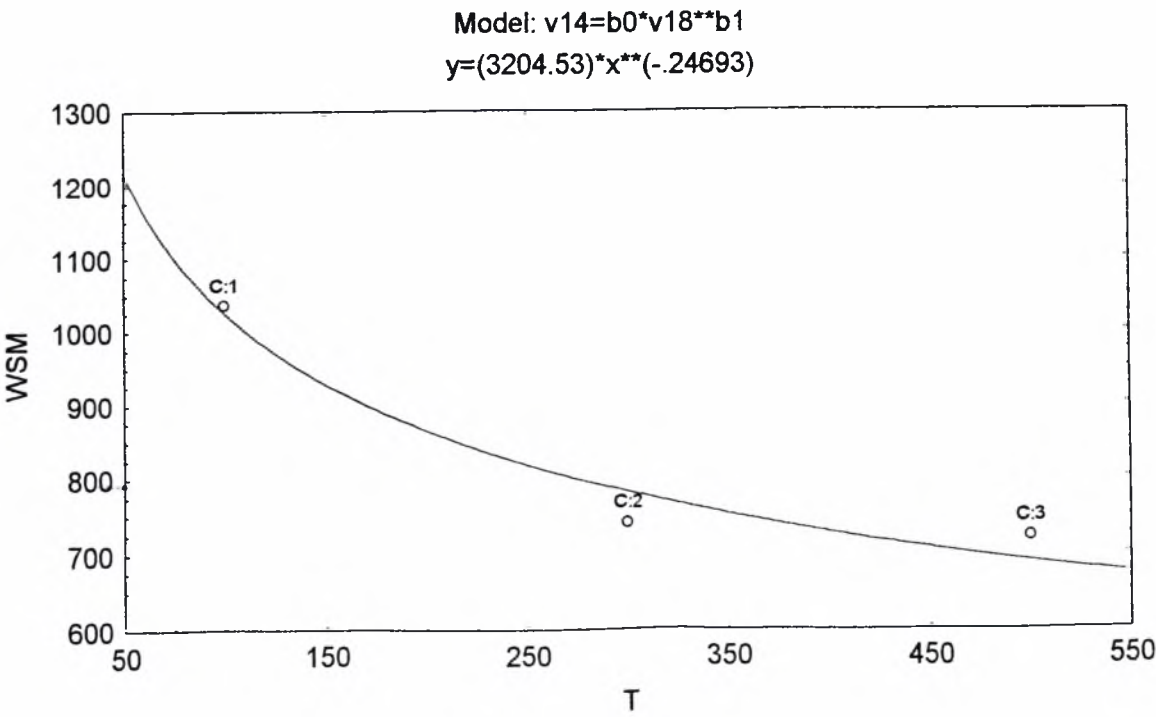
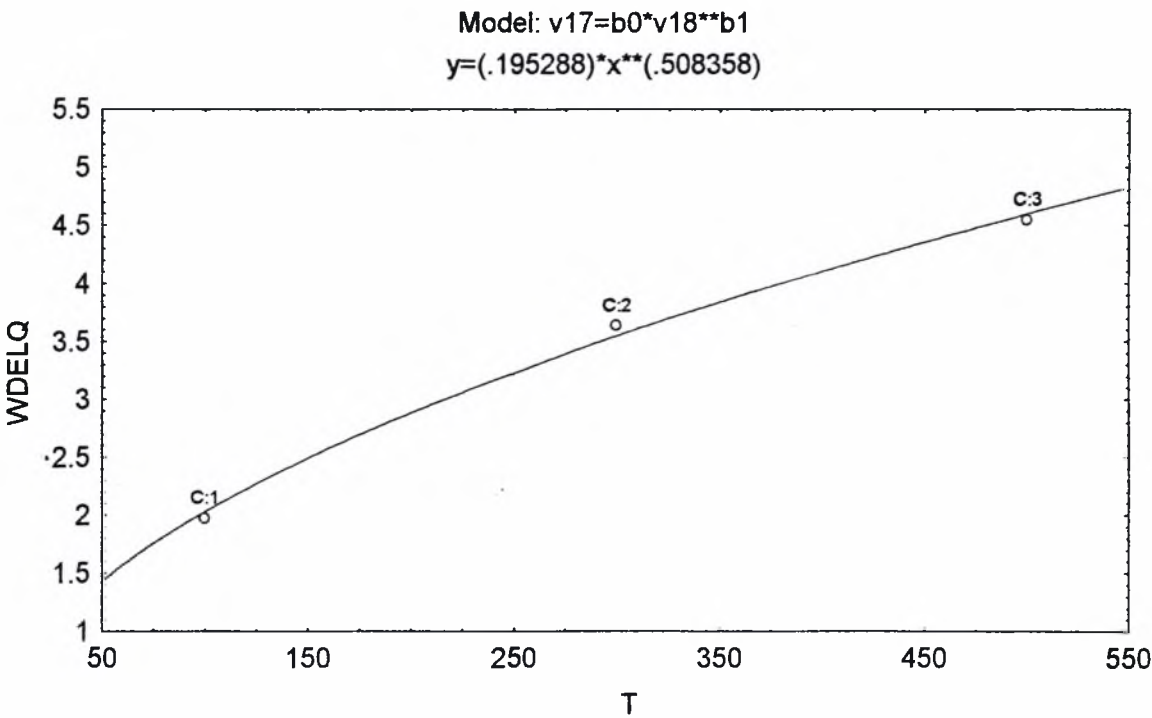


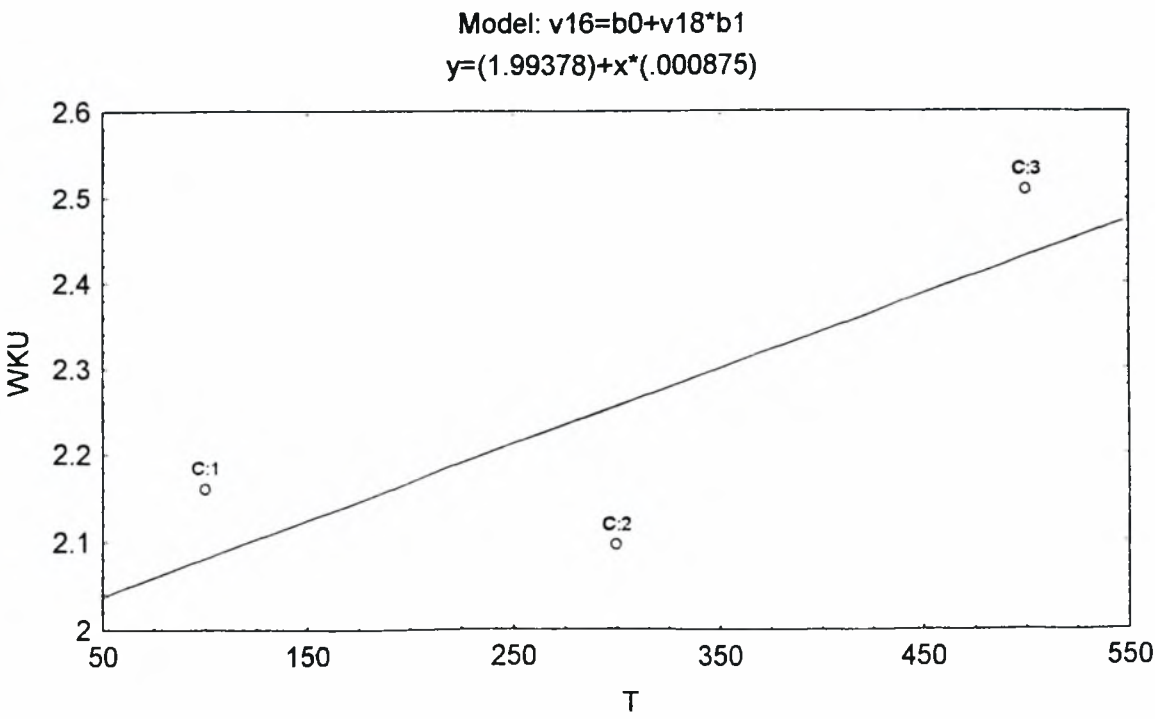
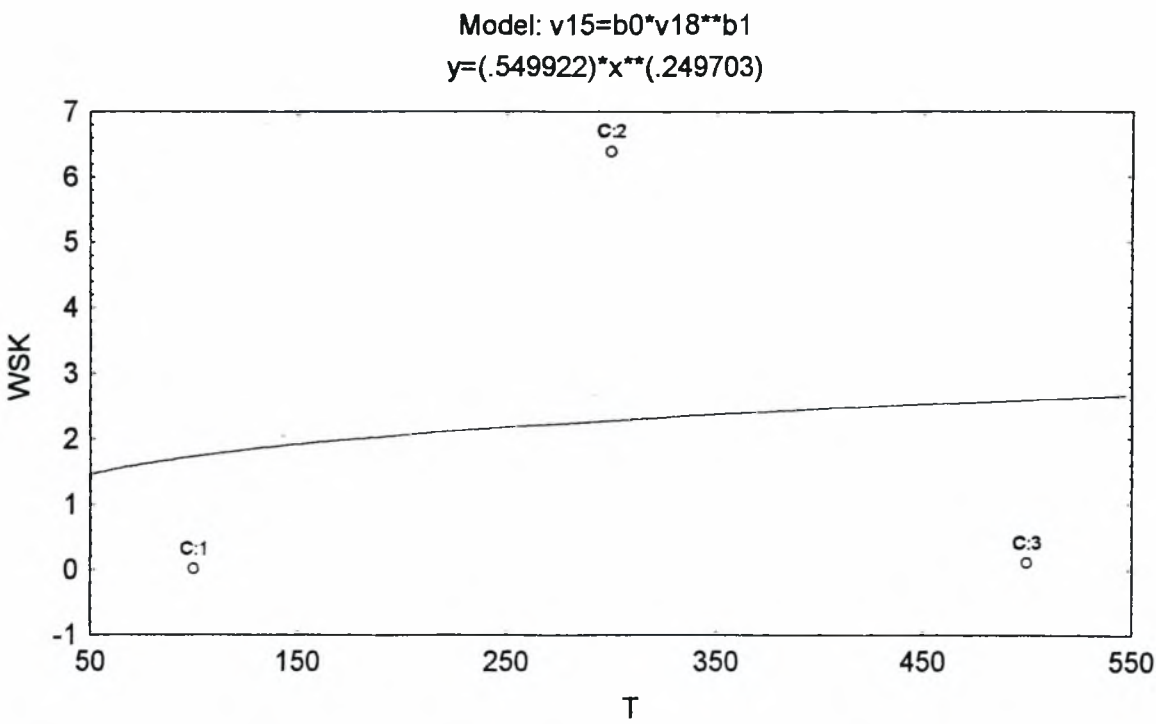








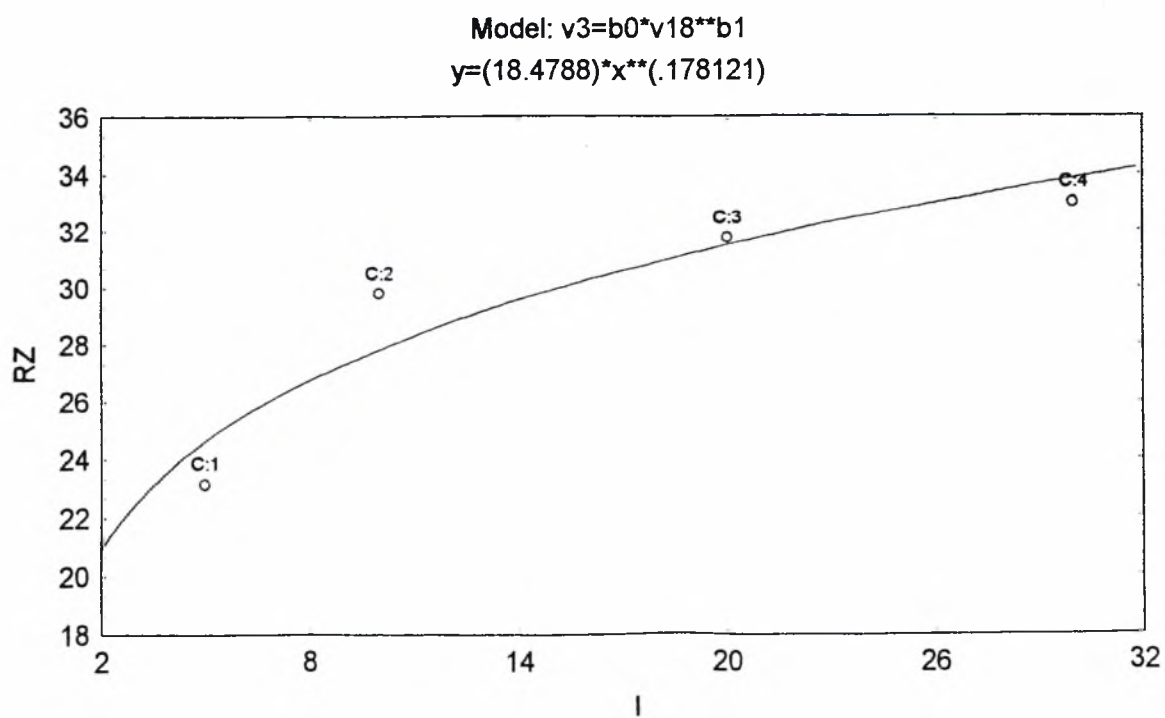
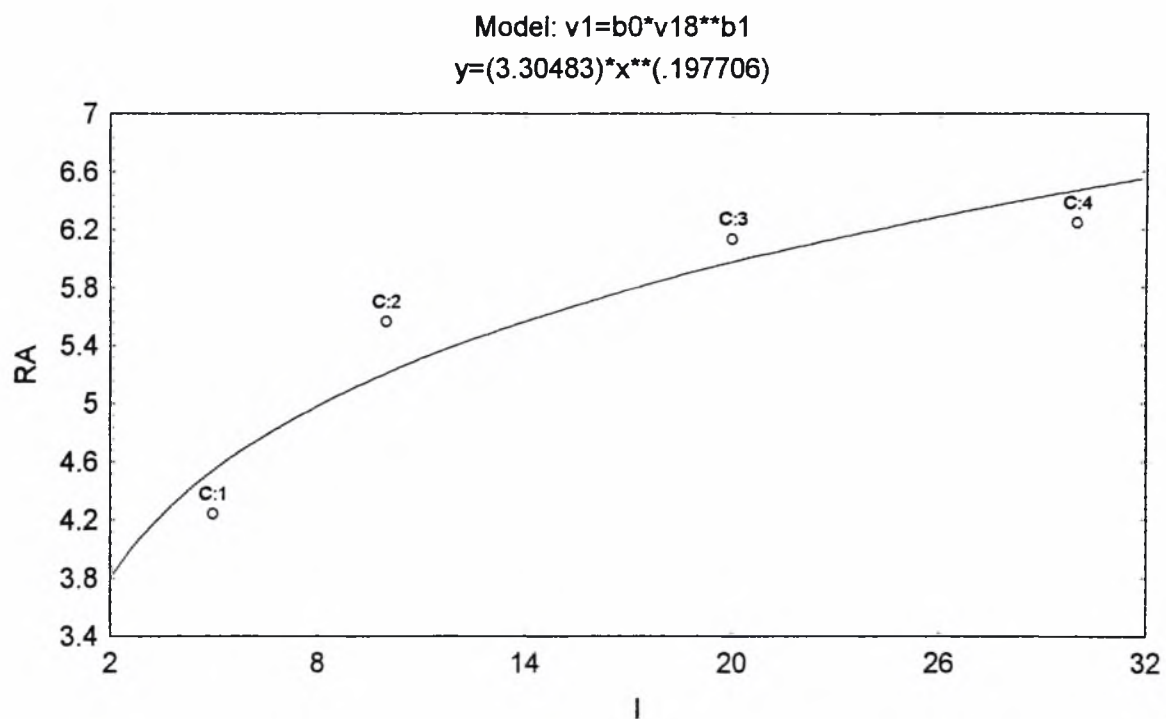




**Πίνακας Ε** Συσχέτιση παραμέτρων με το ρεύμα  $I$  για χρόνο  $T=100\mu\text{sec}$  σταθερό

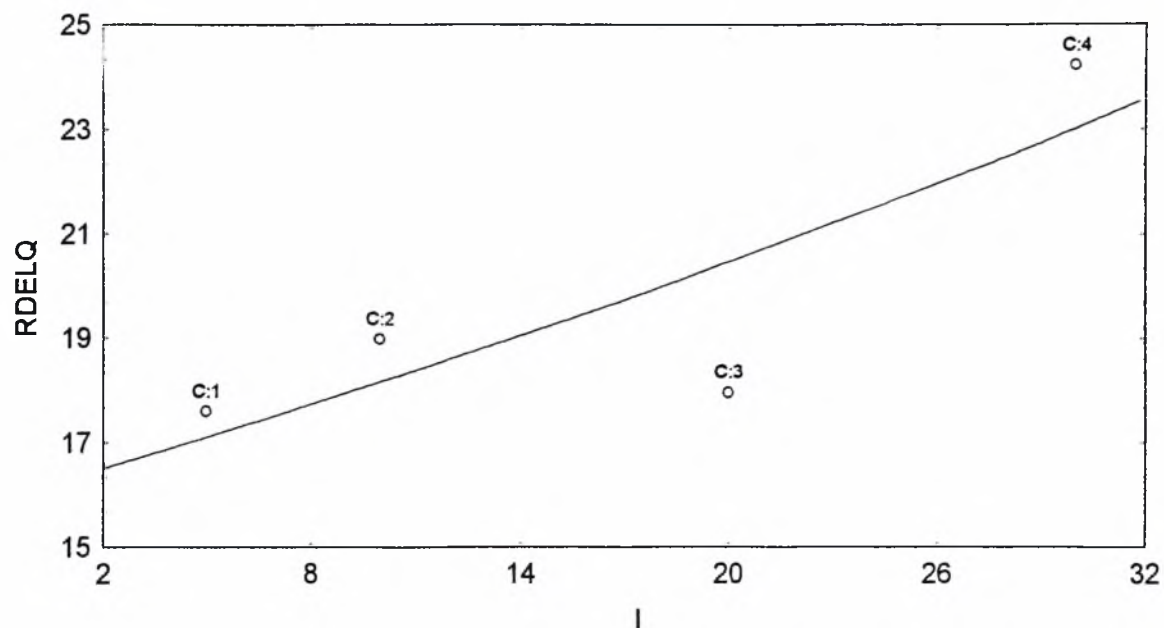
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	3,305	0,198	0,941	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v3	$R_{zDIN}$	18,479	0,178	0,939	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v8	$R_{DelQ}$	16,122	0,012	0,835	$y=b_0 \cdot \exp^{(b_1 \cdot x)}$
v5	$R_{Sm}$	130,663	0,021	0,977	$y=b_0 \cdot \exp^{(b_1 \cdot x)}$
v6	$R_{sk}$	0,033	0,882	0,987	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v7	$R_{ku}$	2,810	0,008	0,930	$y=b_0 \cdot \exp^{(b_1 \cdot x)}$
v10	$W_a$	2,187	0,105	0,999	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v12	$W_{zDIN}$	5,514	0,321	0,989	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v17	$W_{DelQ}$	0,831	0,038	0,993	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v14	$W_{Sm}$	1.082,570	-0,041	0,229	$y=b_0 \cdot x^{b_1}$
v15	$W_{sk}$	0,042	-0,002	0,424	$y=b_0+b_1 \cdot x$
v16	$W_{ku}$	2,249	-0,003	0,285	$y=b_0+b_1 \cdot x$



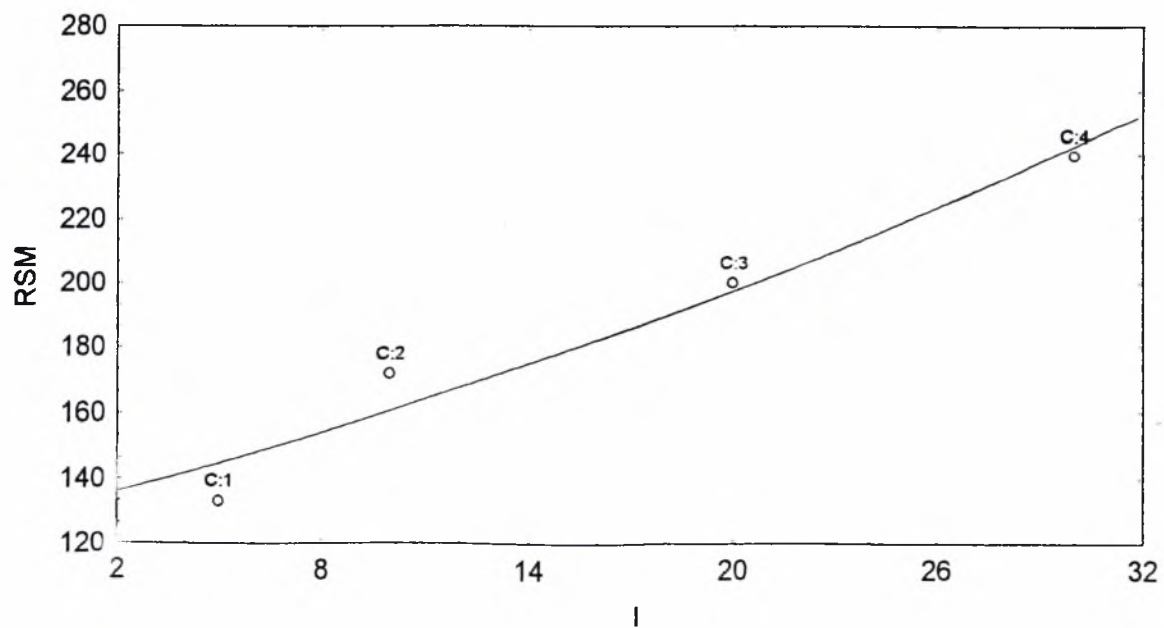


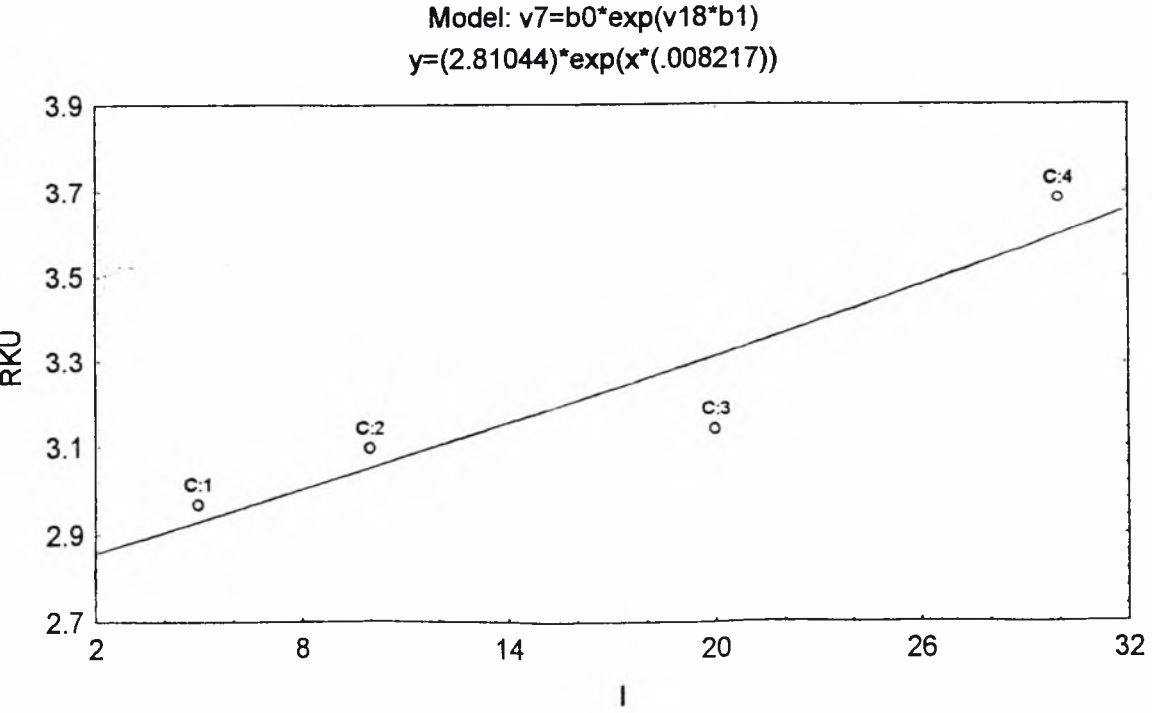
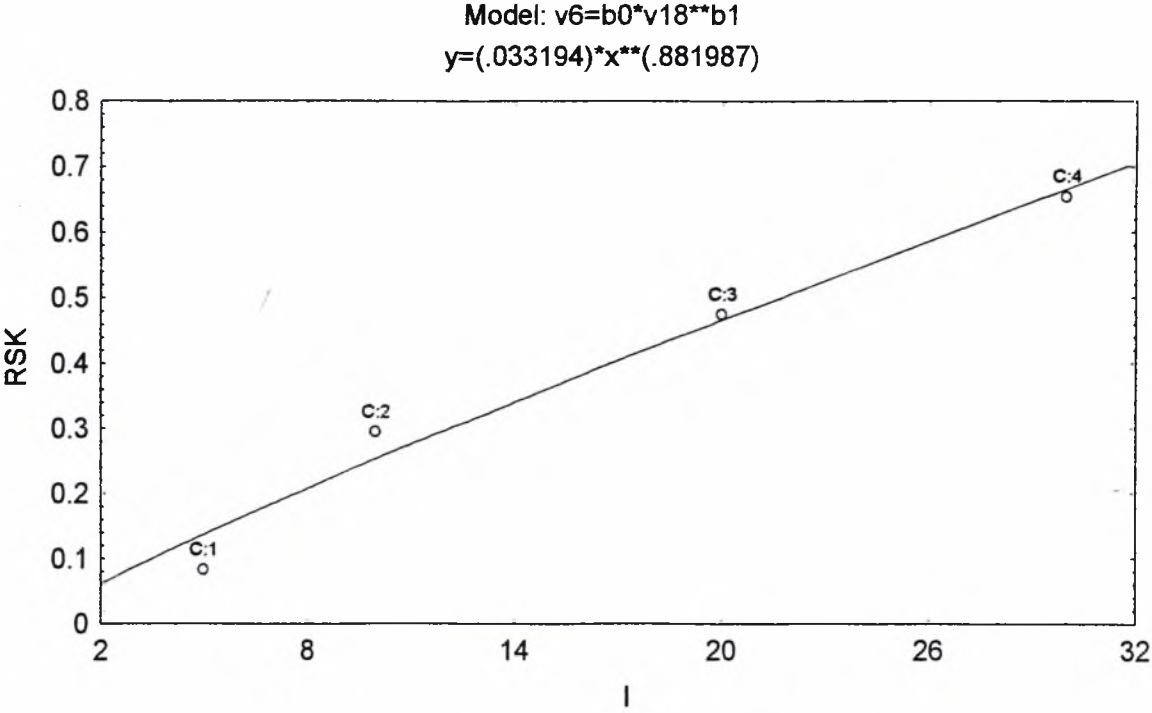


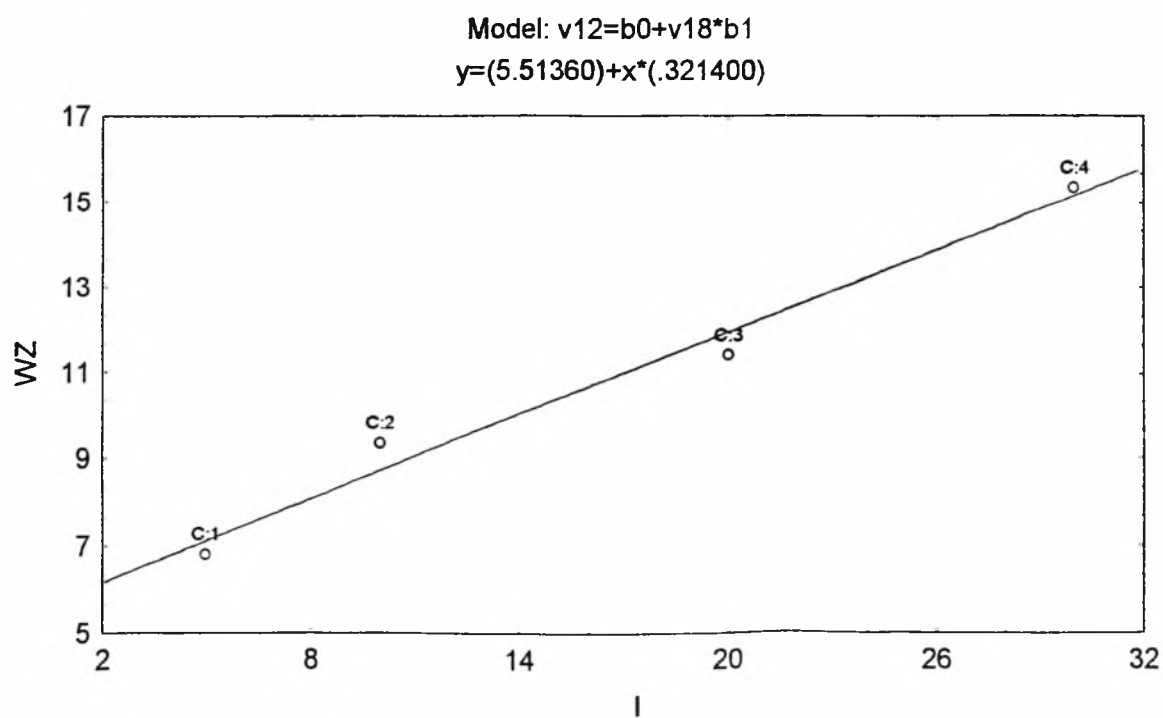
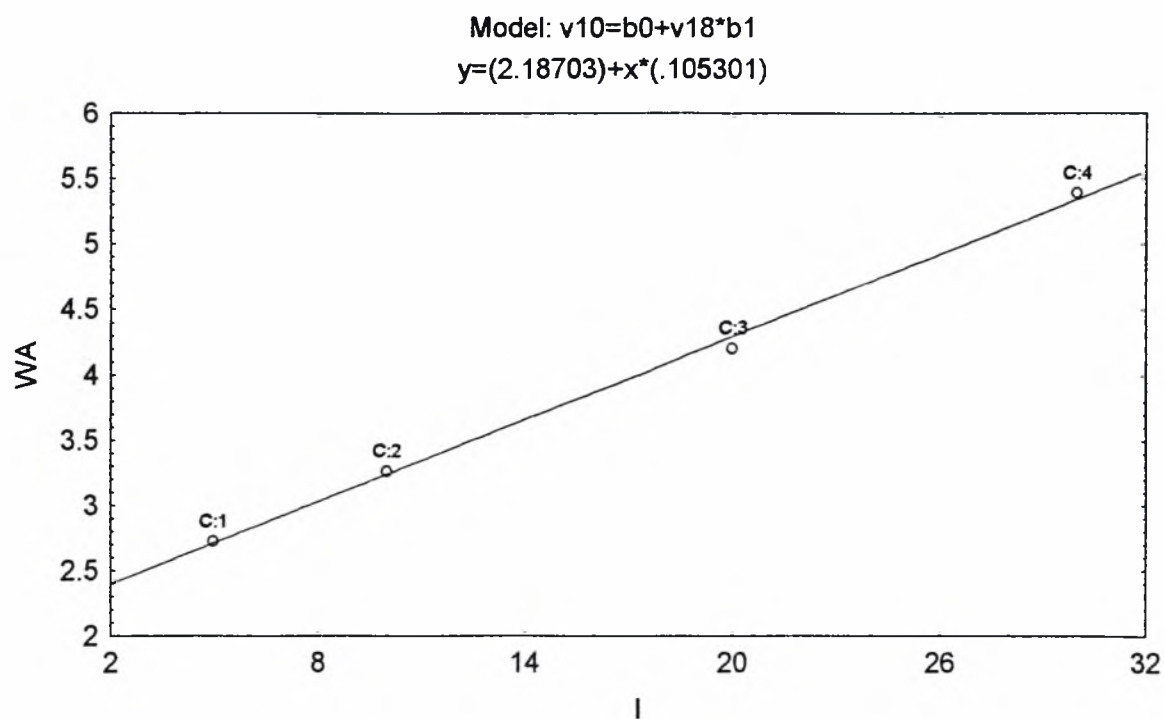
Model:  $v8=b0*\exp(v18*b1)$   
 $y=(16.1215)*\exp(x*(.011892))$

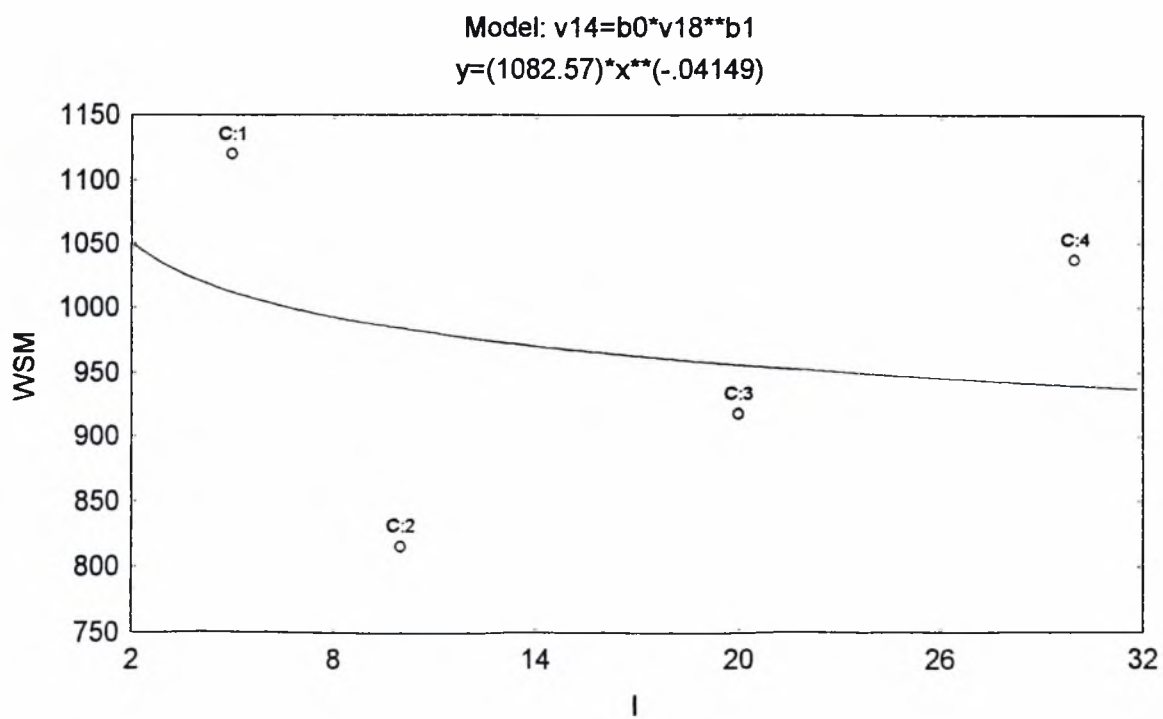
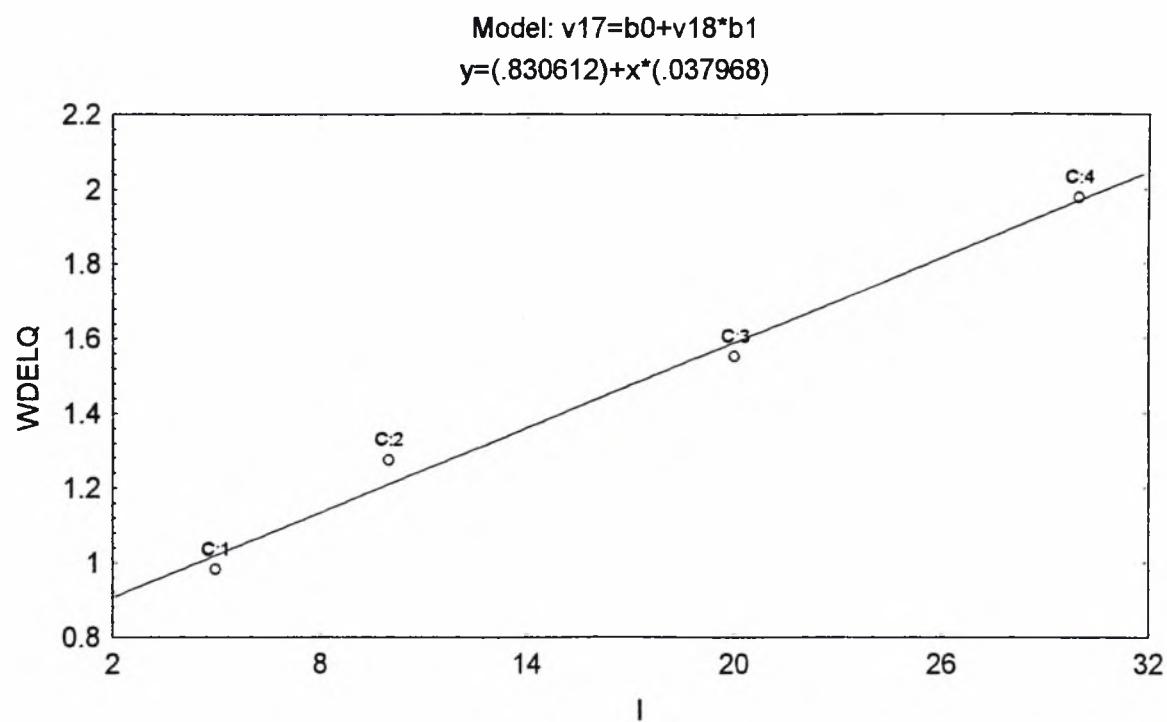


Model:  $v5=b0*\exp(v18*b1)$   
 $y=(130.663)*\exp(x*(.020656))$

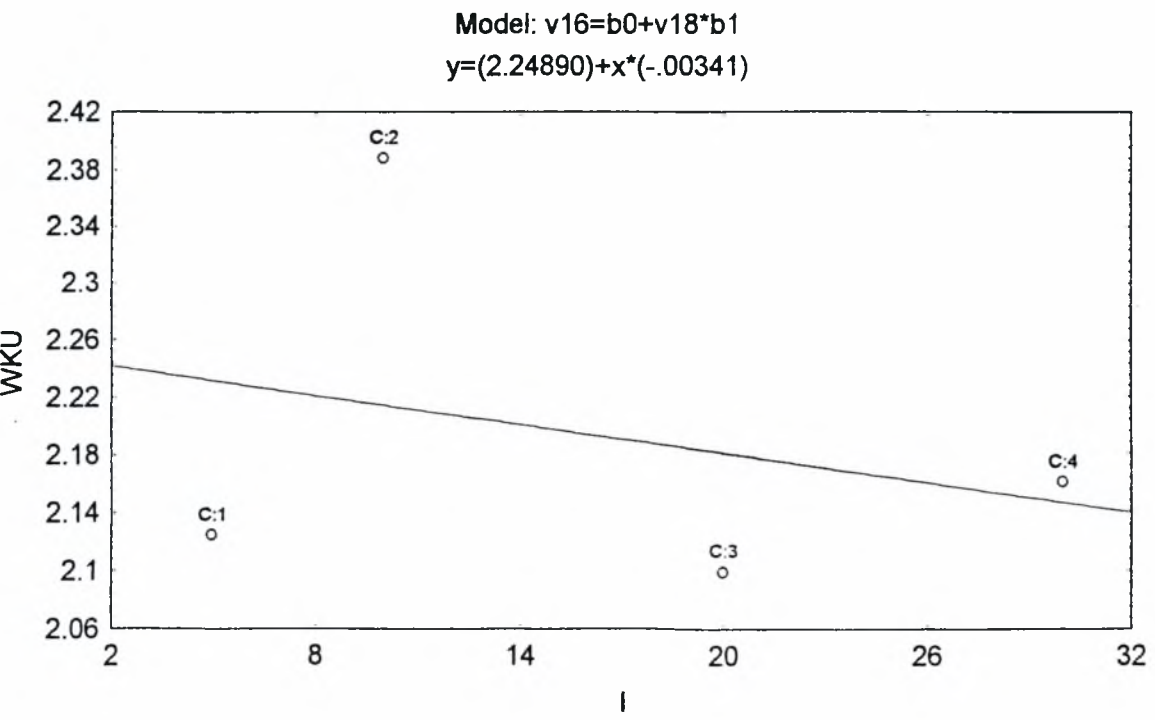
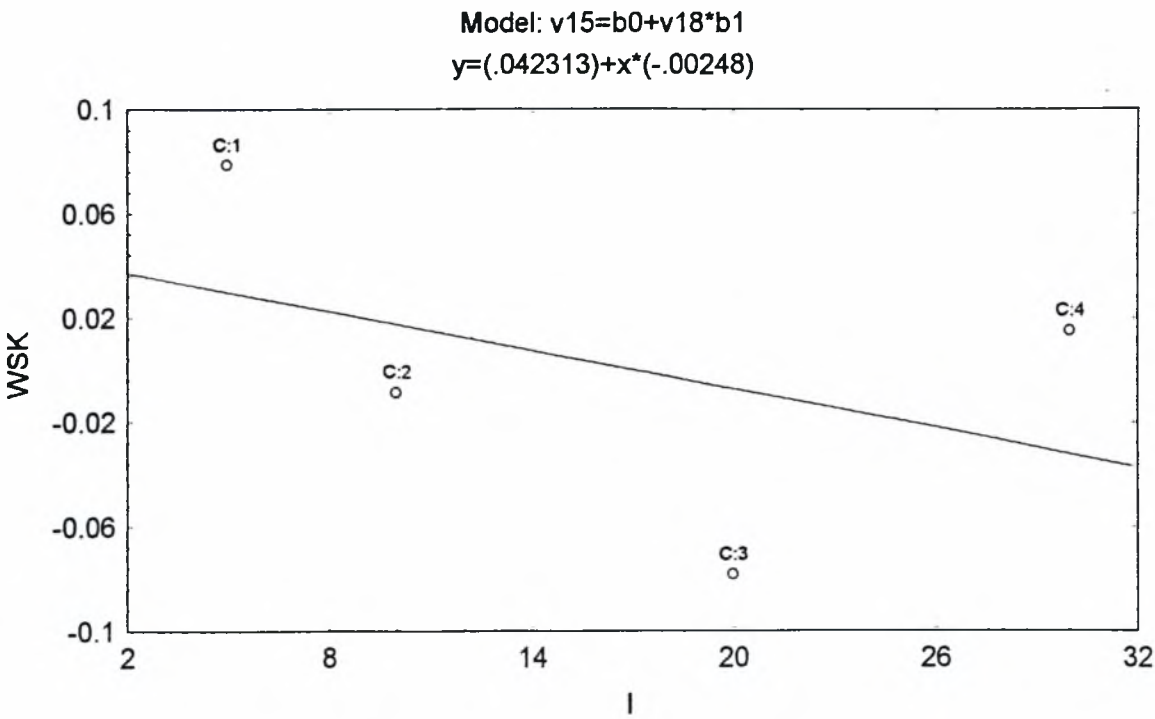






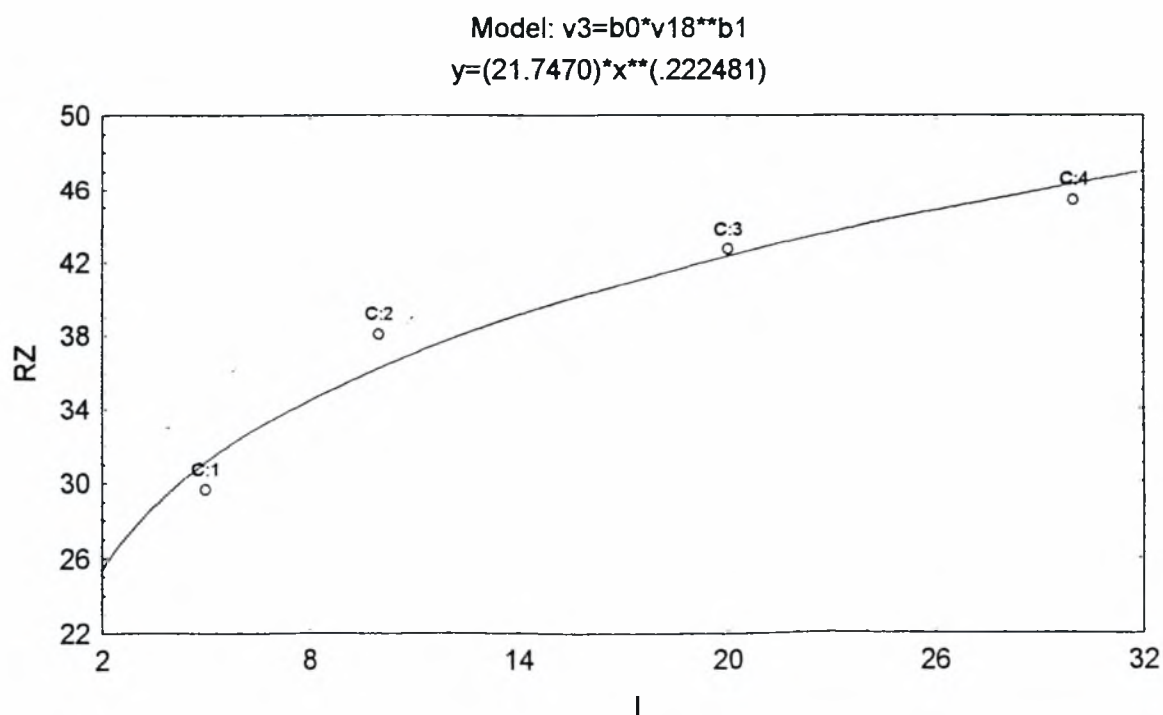
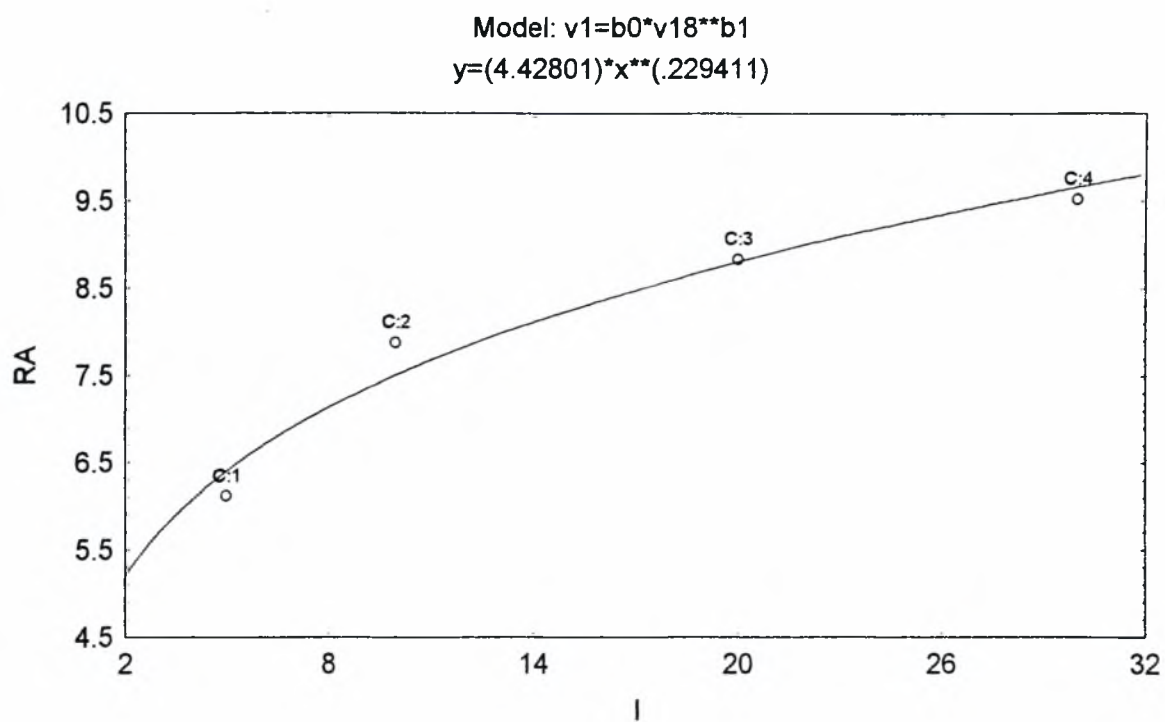


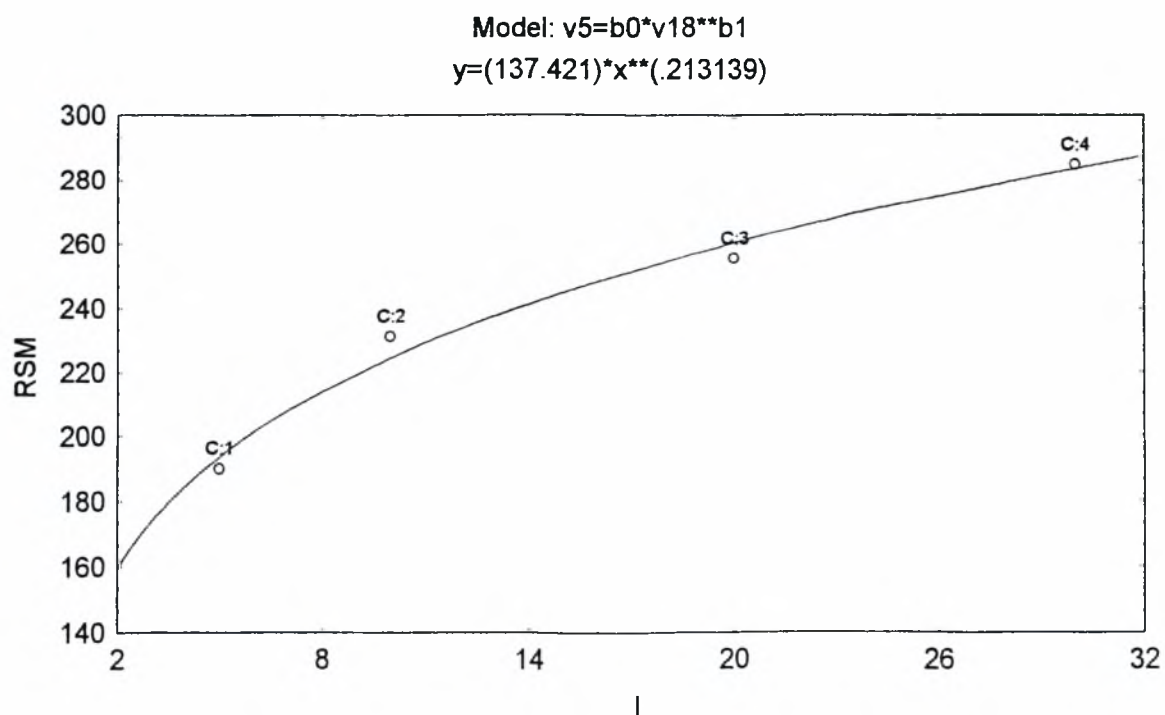
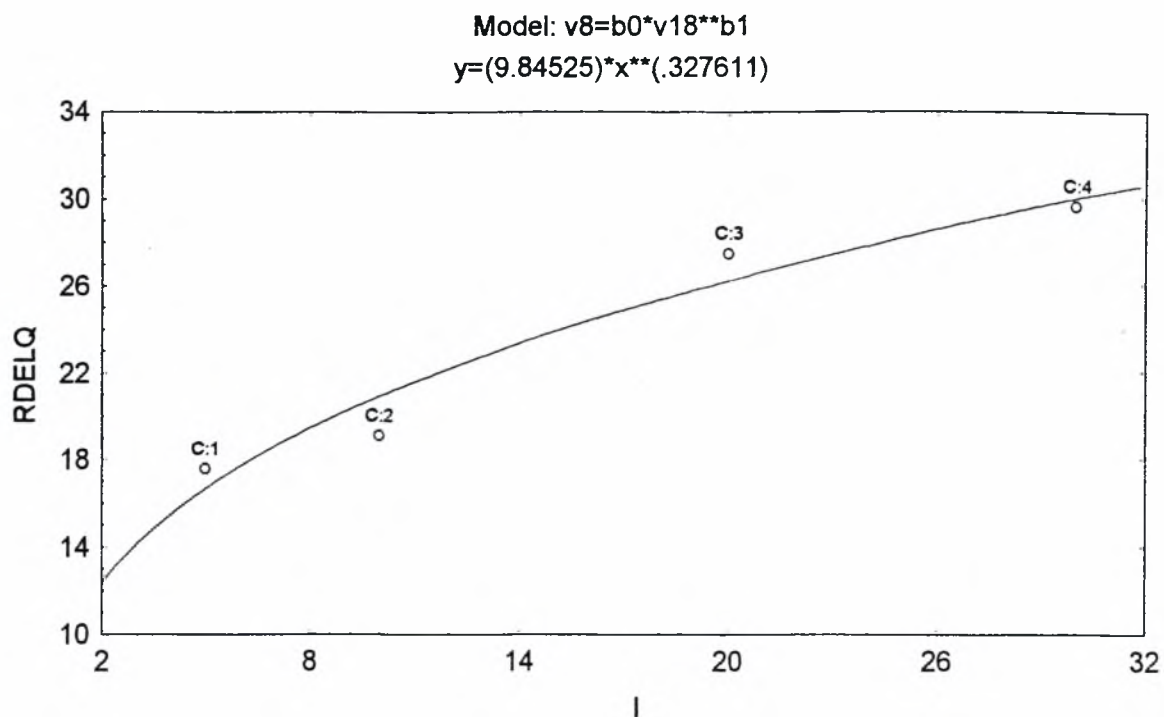


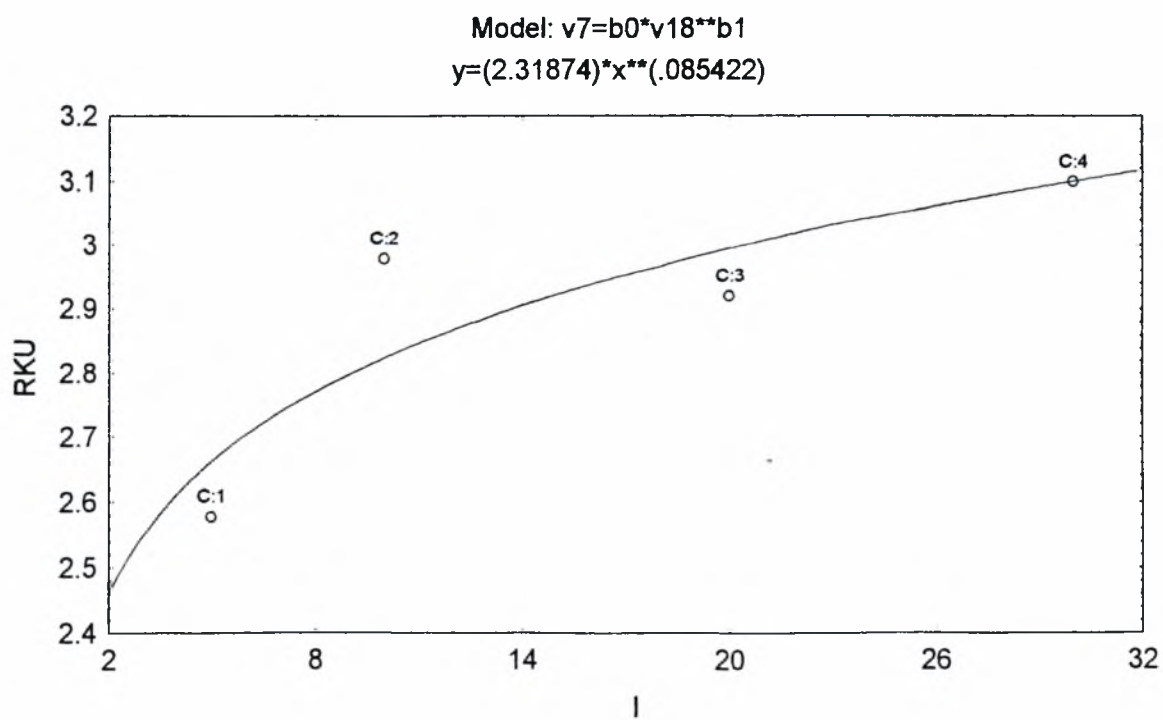
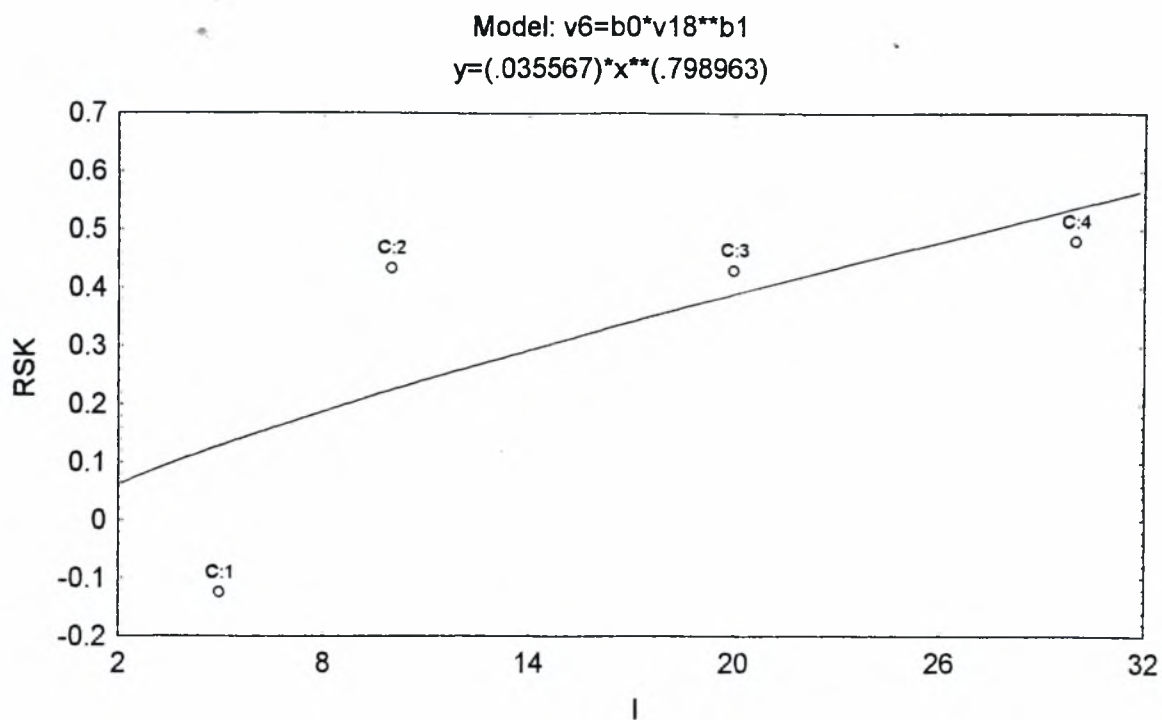


**Πίνακας F** Συσχέτιση παραμέτρων με το ρεύμα  $I$  για χρόνο  $T=300\mu\text{sec}$  σταθερό

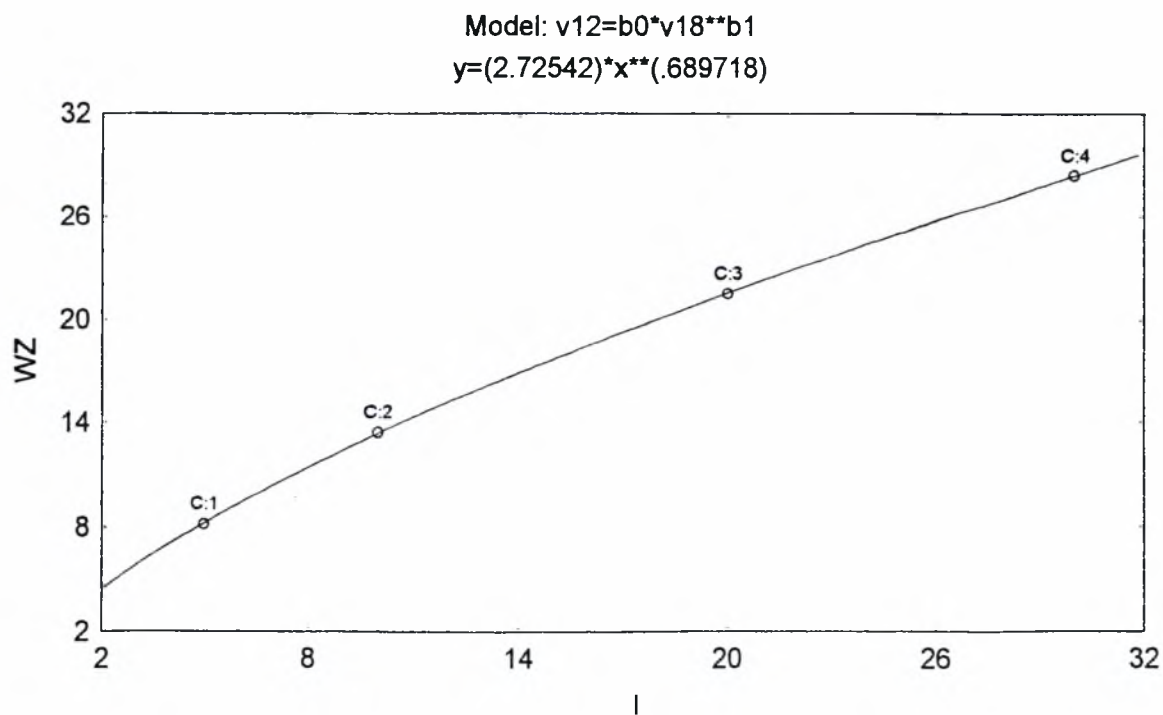
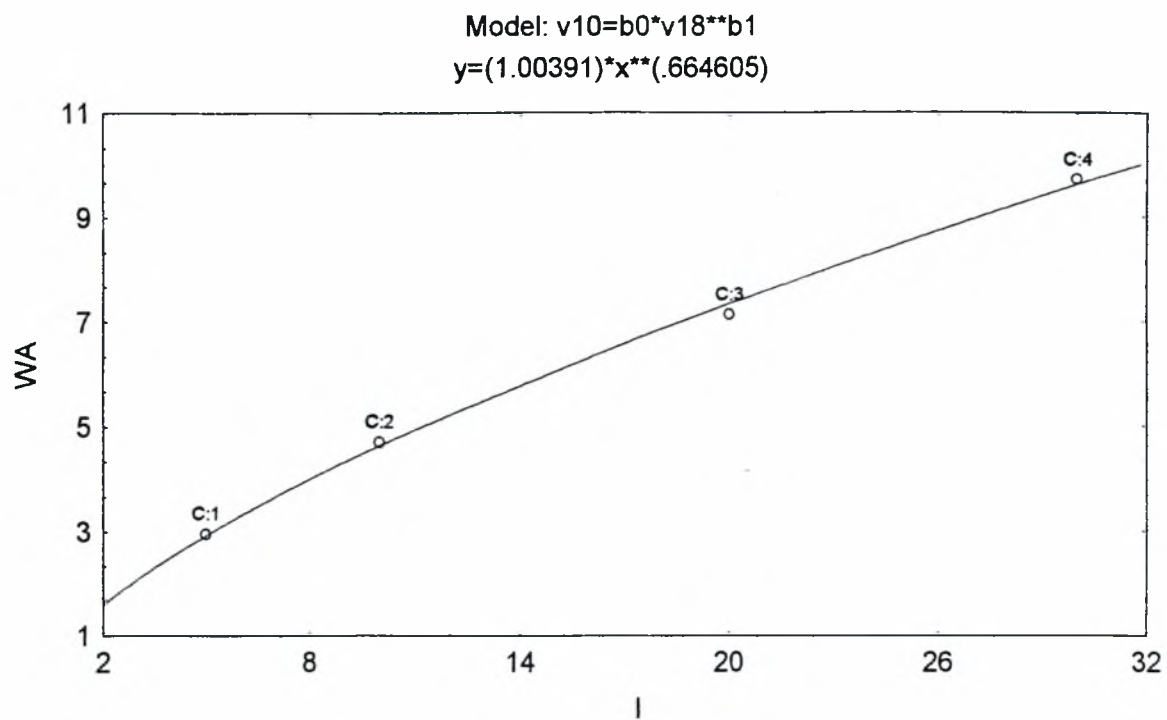
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	4,428	0,229	0,981	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v3	$R_{zDIN}$	21,747	0,222	0,977	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v8	$R_{DelQ}$	9,845	0,328	0,973	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v5	$R_{Sm}$	137,421	0,213	0,991	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v6	$R_{sk}$	0,036	0,799	0,737	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v7	$R_{ku}$	2,319	0,085	0,869	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v10	$W_a$	1,004	0,665	0,999	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v12	$W_{zDIN}$	2,725	0,690	0,999	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v17	$W_{DelQ}$	0,496	0,585	0,999	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v14	$W_{Sm}$	746,901	0,007	0,175	$y=b0 \cdot x^{b1}$
v15	$W_{sk}$	0,003	0,256	0,995	$y=b0 \cdot \exp^{(b1 \cdot x)}$
v16	$W_{ku}$	2,481	-0,006	0,881	$y=b0 \cdot \exp^{(b1 \cdot x)}$

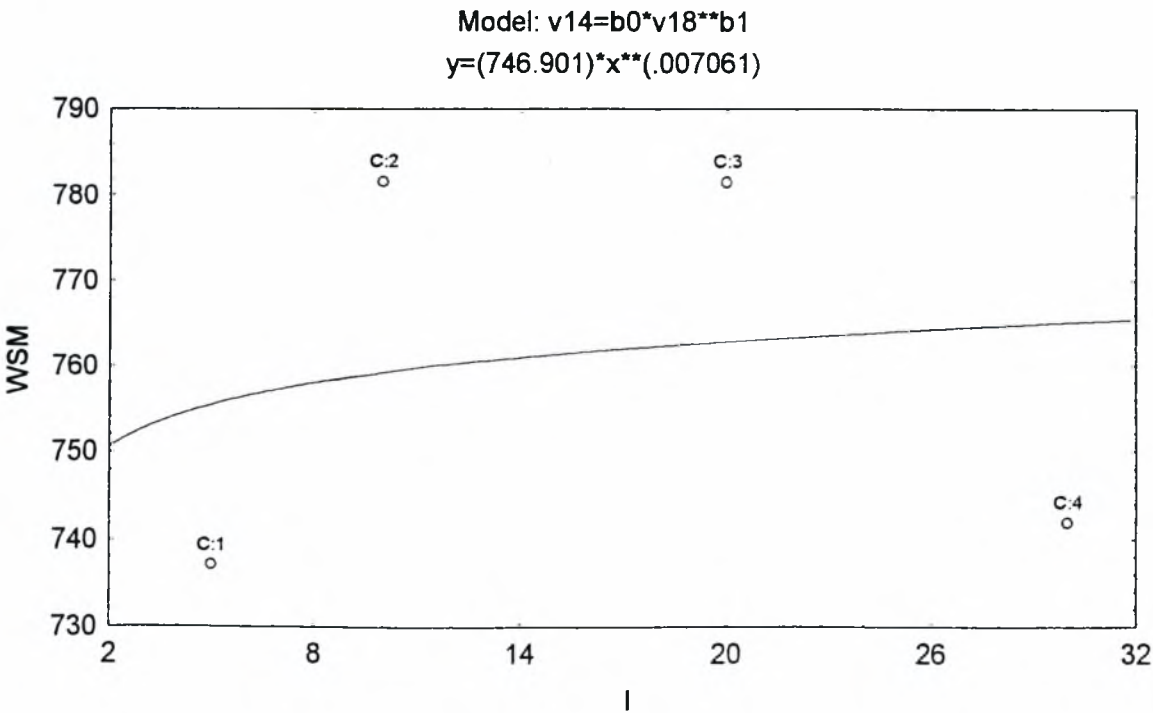
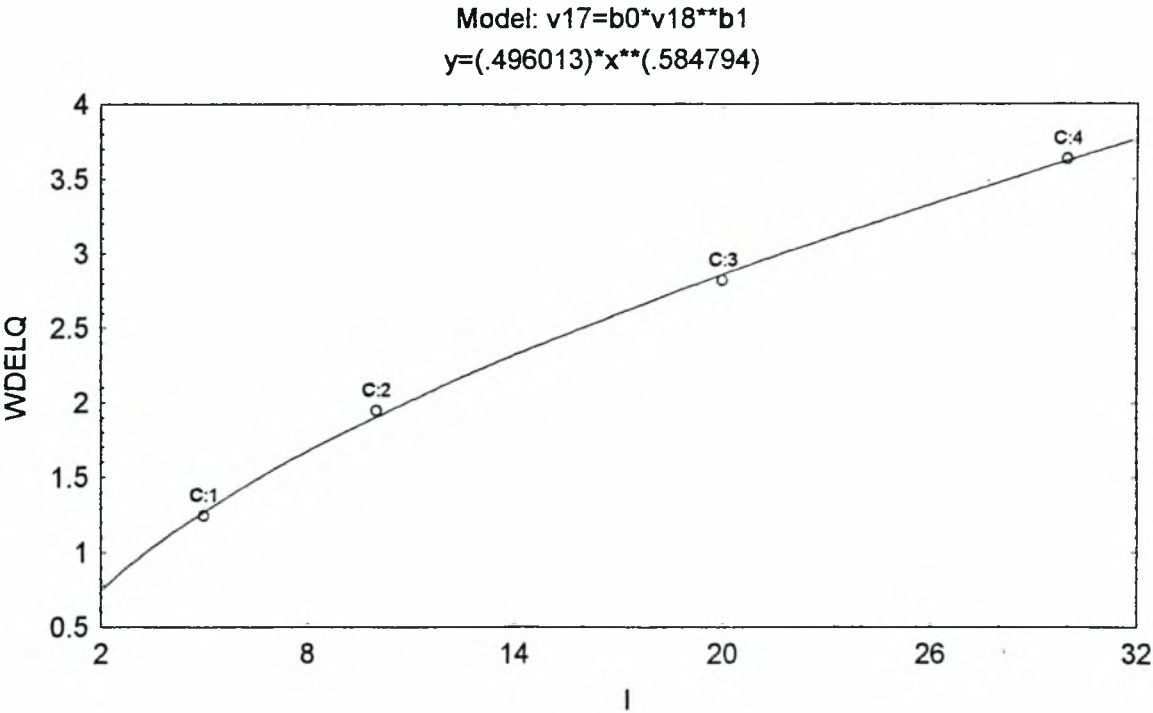


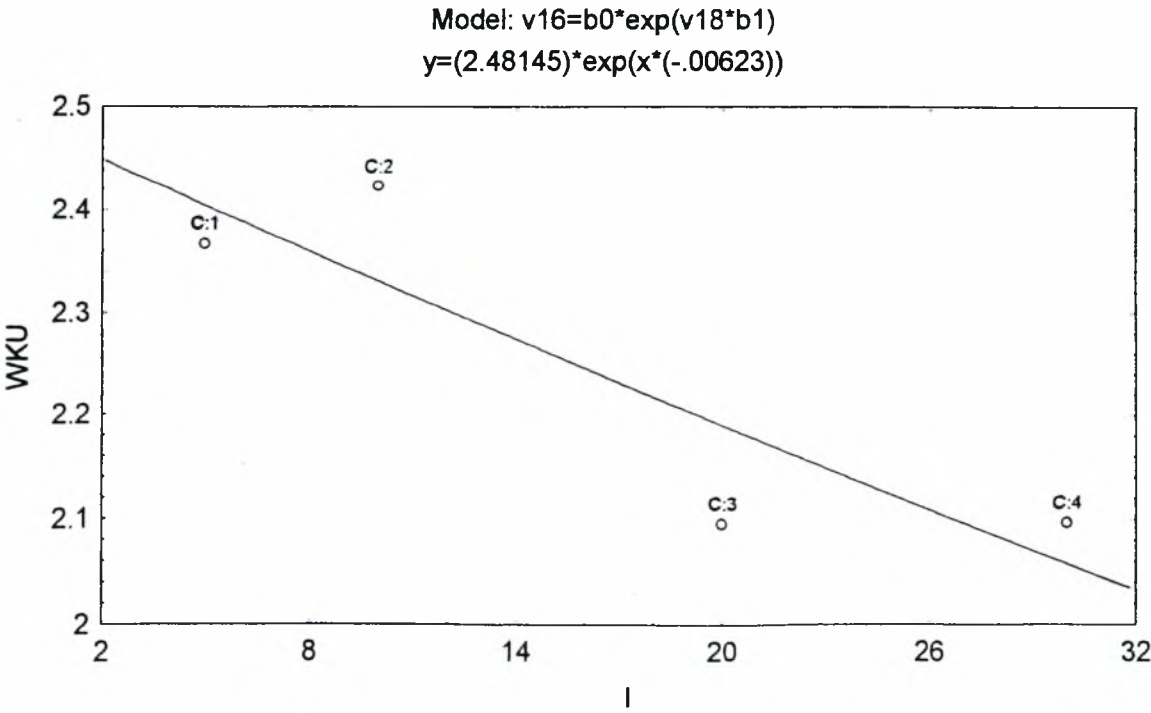
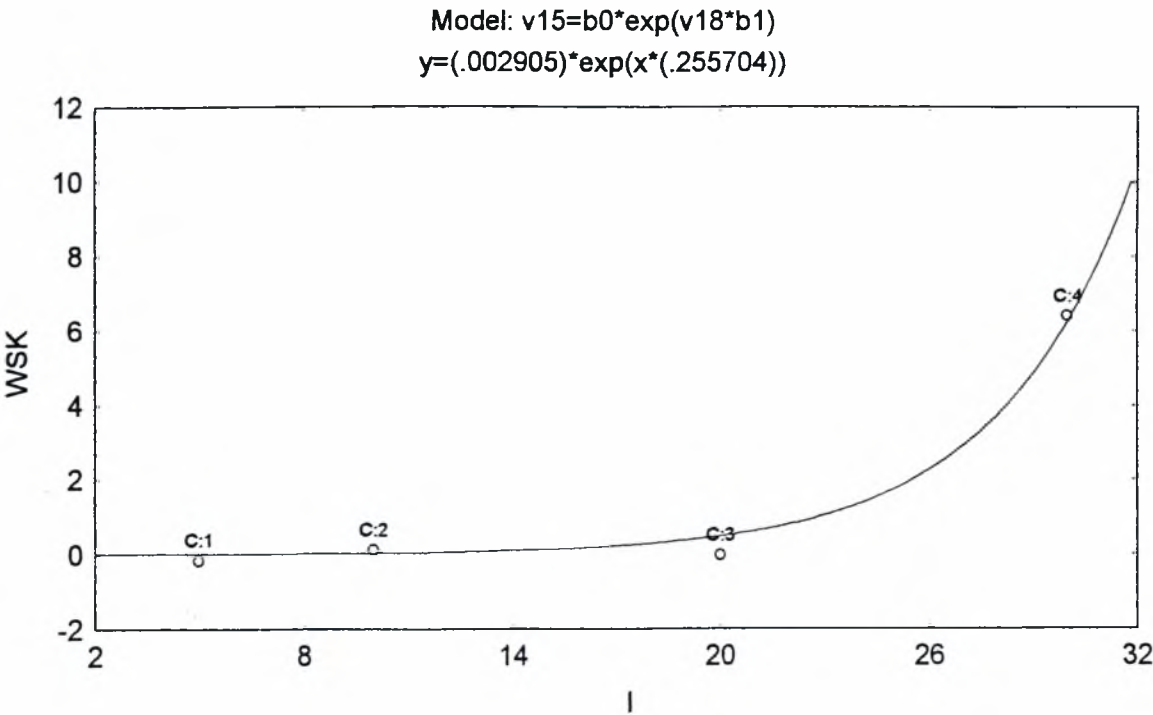






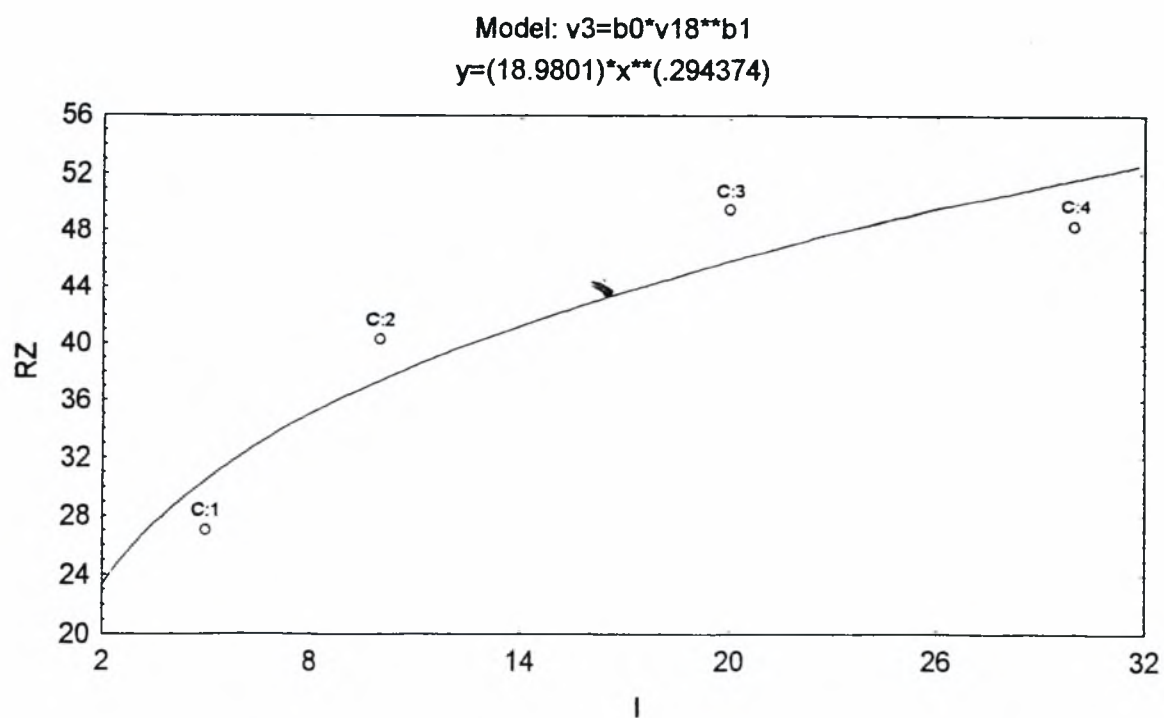
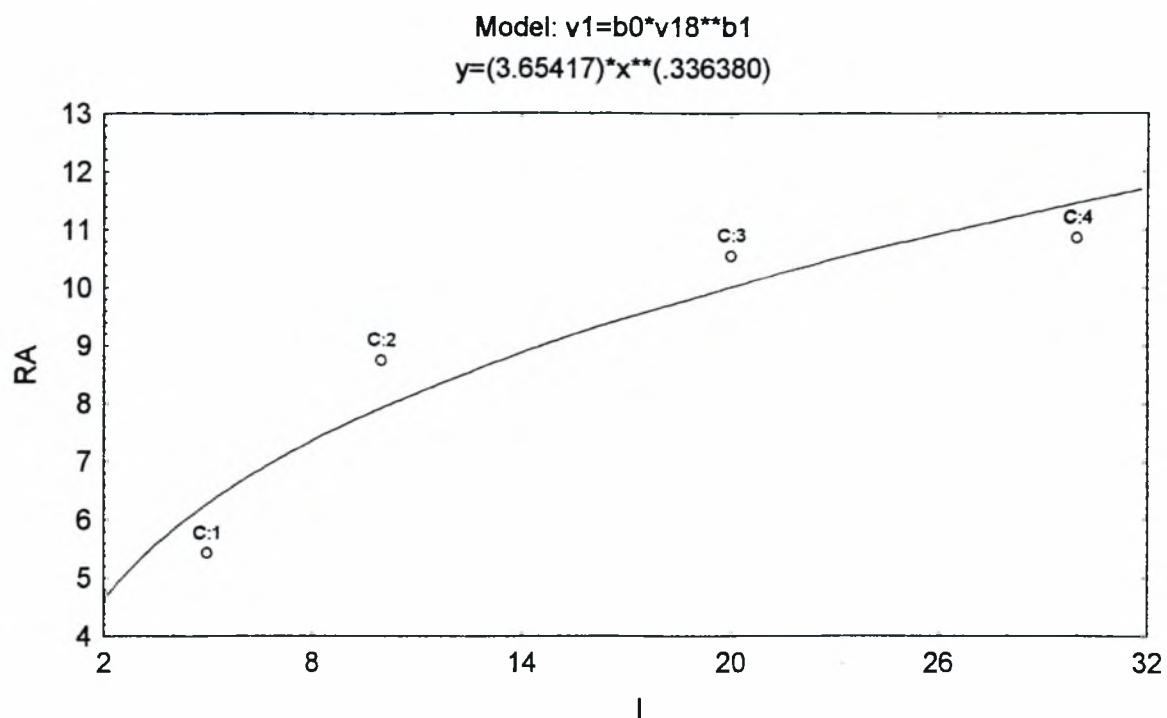




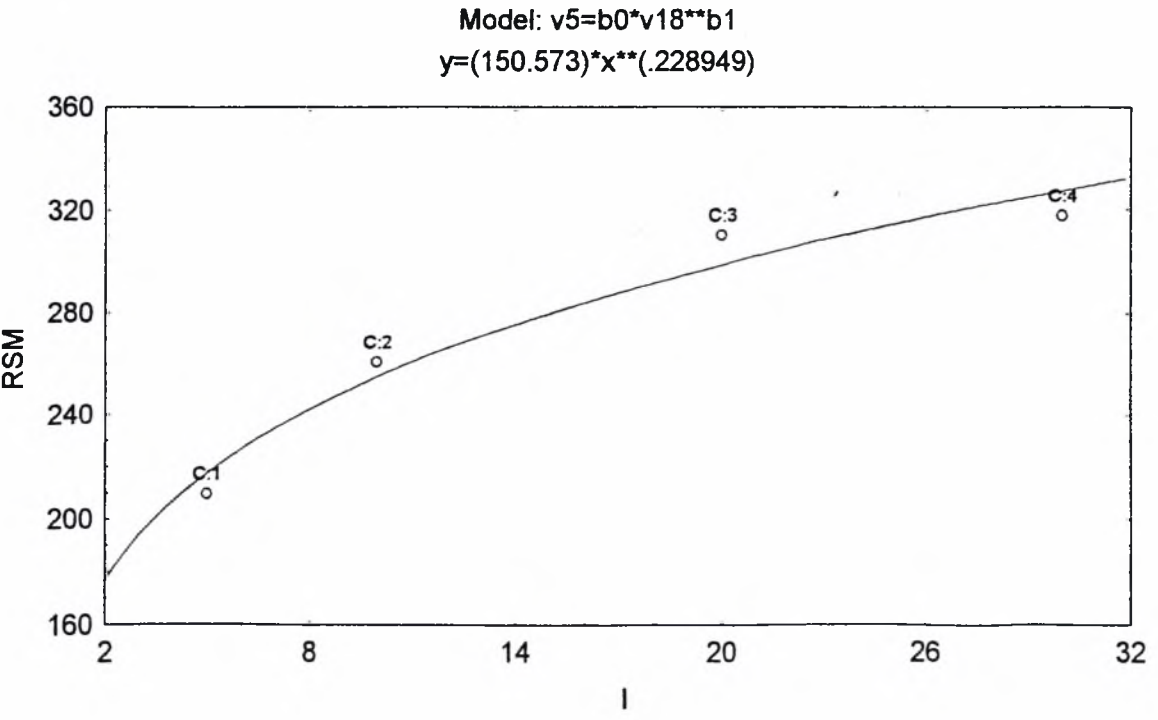
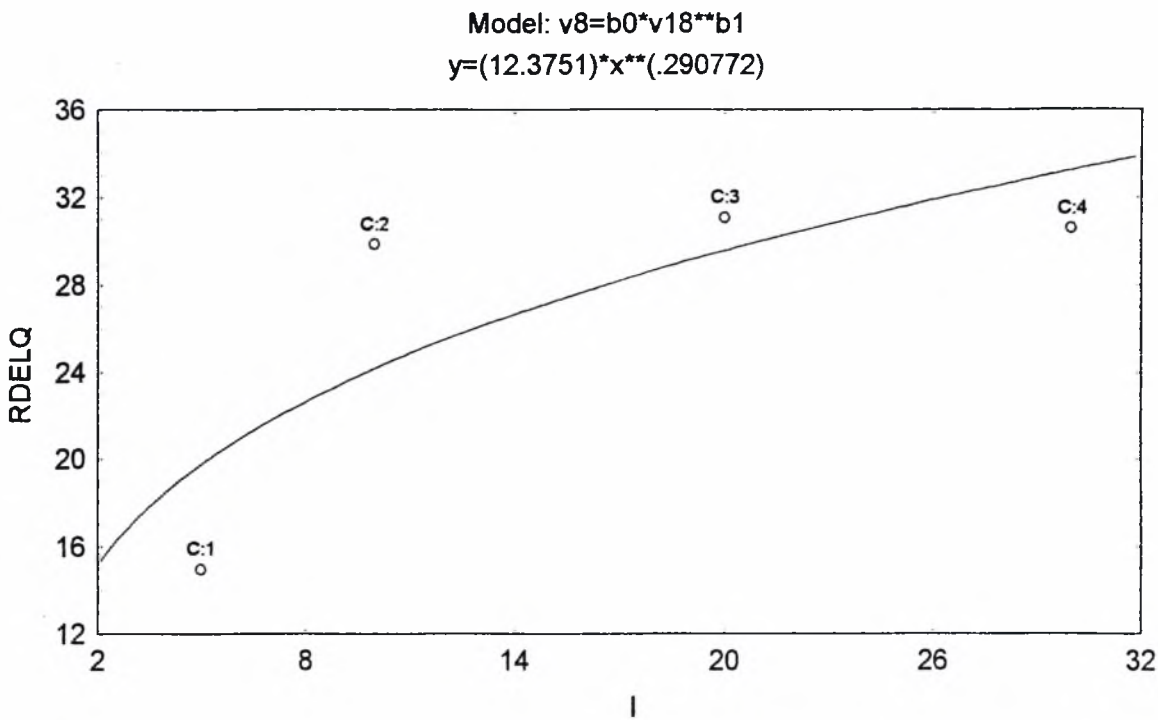


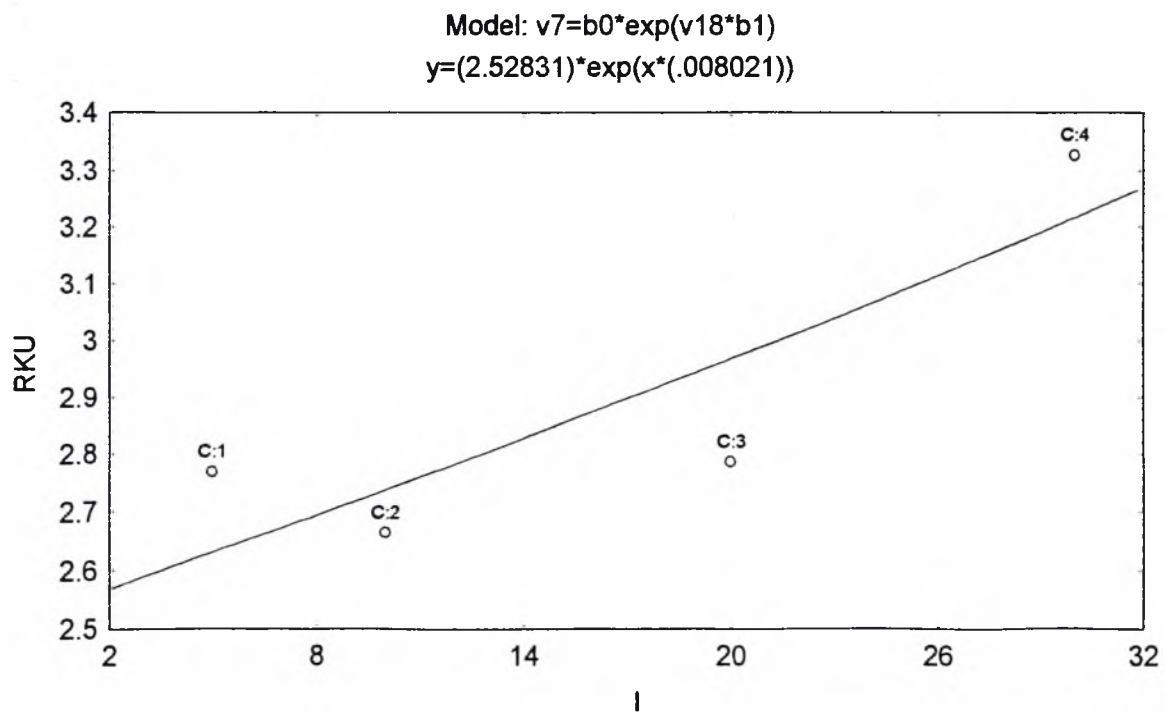
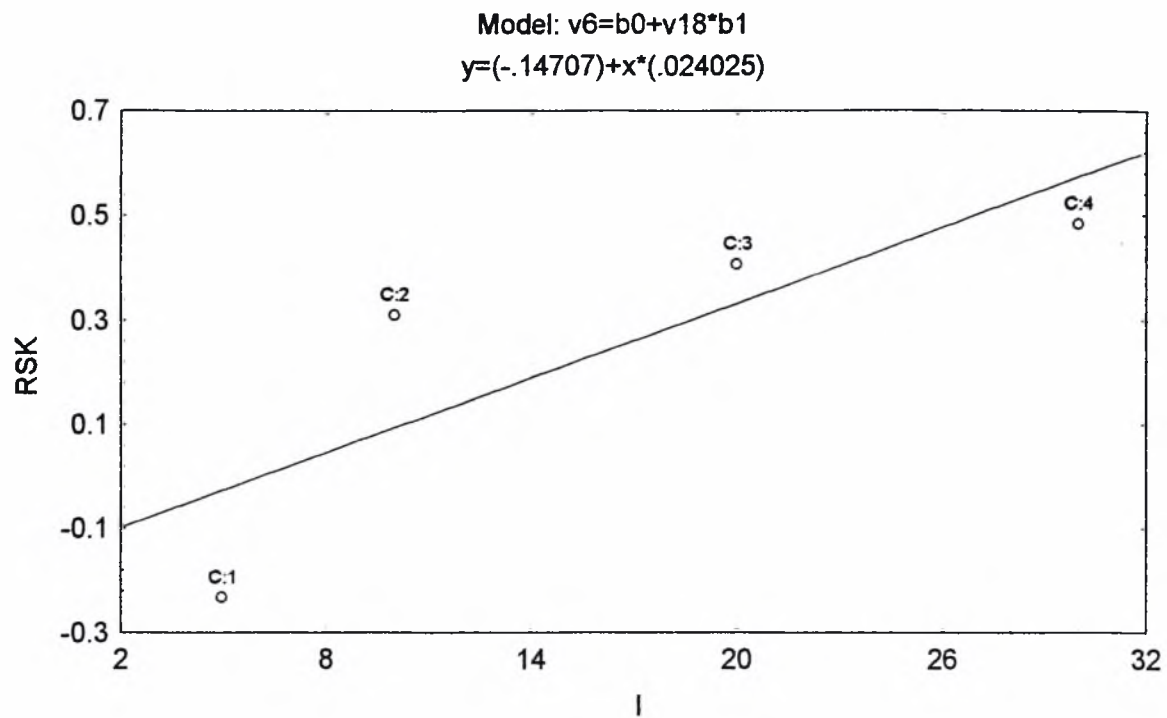
**Πίνακας G** Συσχέτιση παραμέτρων με το ρεύμα  $I$  για χρόνο  $T=500\mu\text{sec}$  σταθερό

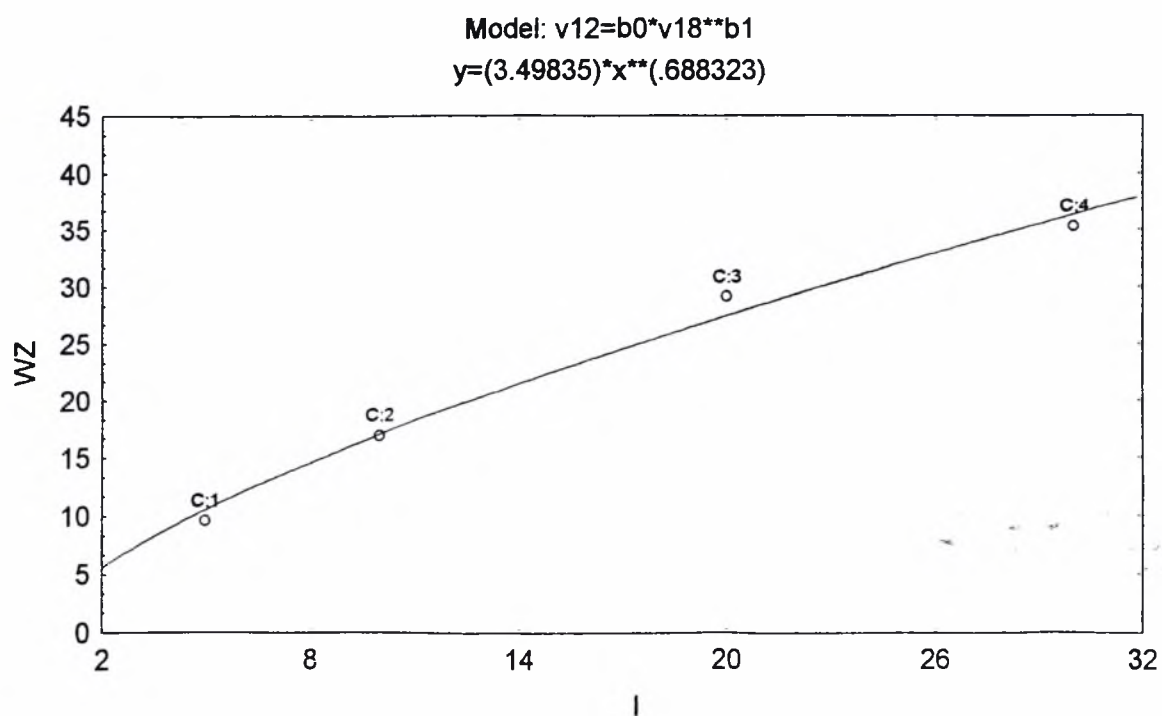
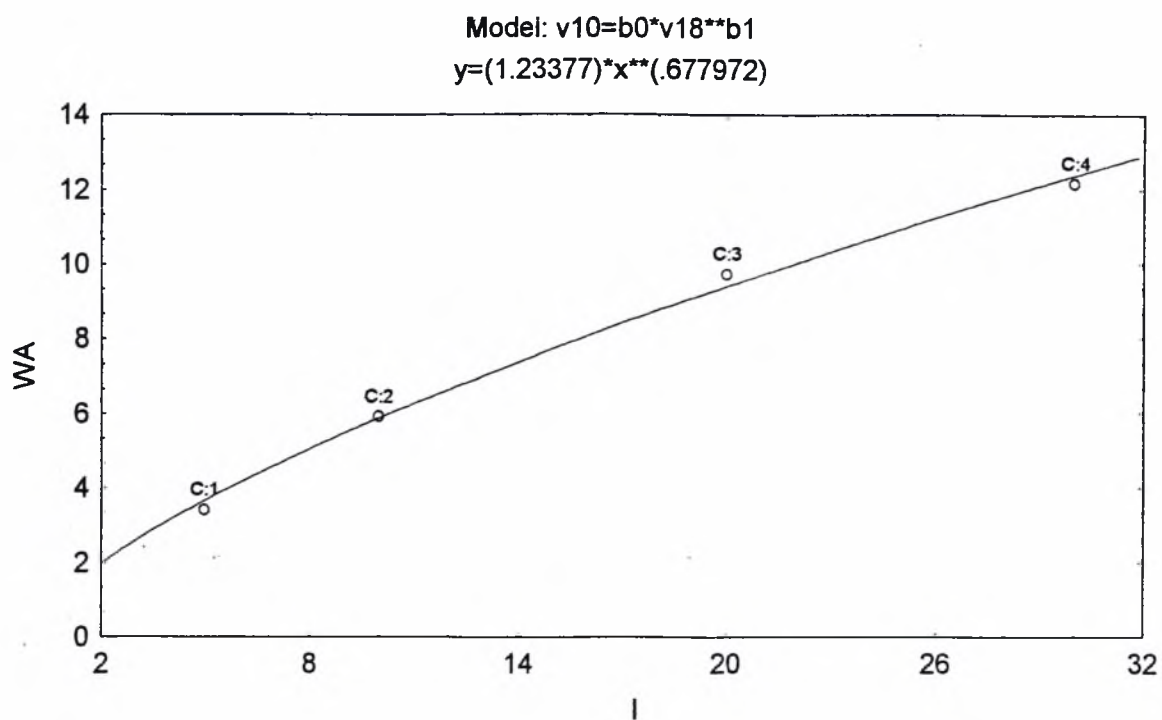
	Παράμετρος	b0	b1	r	Μοντέλλο συσχέτισης
v1	$R_a$	3,654	0,336	0,944	$y=b0*x^{b1}$
v3	$R_{zDIN}$	18,980	0,294	0,929	$y=b0*x^{b1}$
v8	$R_{DelQ}$	12,375	0,291	0,804	$y=b0*x^{b1}$
v5	$R_{Sm}$	150,573	0,229	0,978	$y=b0*x^{b1}$
v6	$R_{sk}$	-0,147	0,024	0,821	$y=b0+b1*x$
v7	$R_{ku}$	2,528	0,008	0,859	$y=b0*\exp^{(b1*x)}$
v10	$W_a$	1,234	0,678	0,998	$y=b0*x^{b1}$
v12	$W_{zDIN}$	3,498	0,688	0,994	$y=b0*x^{b1}$
v17	$W_{DelQ}$	0,552	0,626	0,994	$y=b0*x^{b1}$
v14	$W_{Sm}$	1.038,800	-0,140	0,700	$y=b0*x^{b1}$
v15	$W_{sk}$	-0,176	0,010	0,965	$y=b0+b1*x$
v16	$W_{ku}$	2,129	0,005	0,908	$y=b0*\exp^{(b1*x)}$

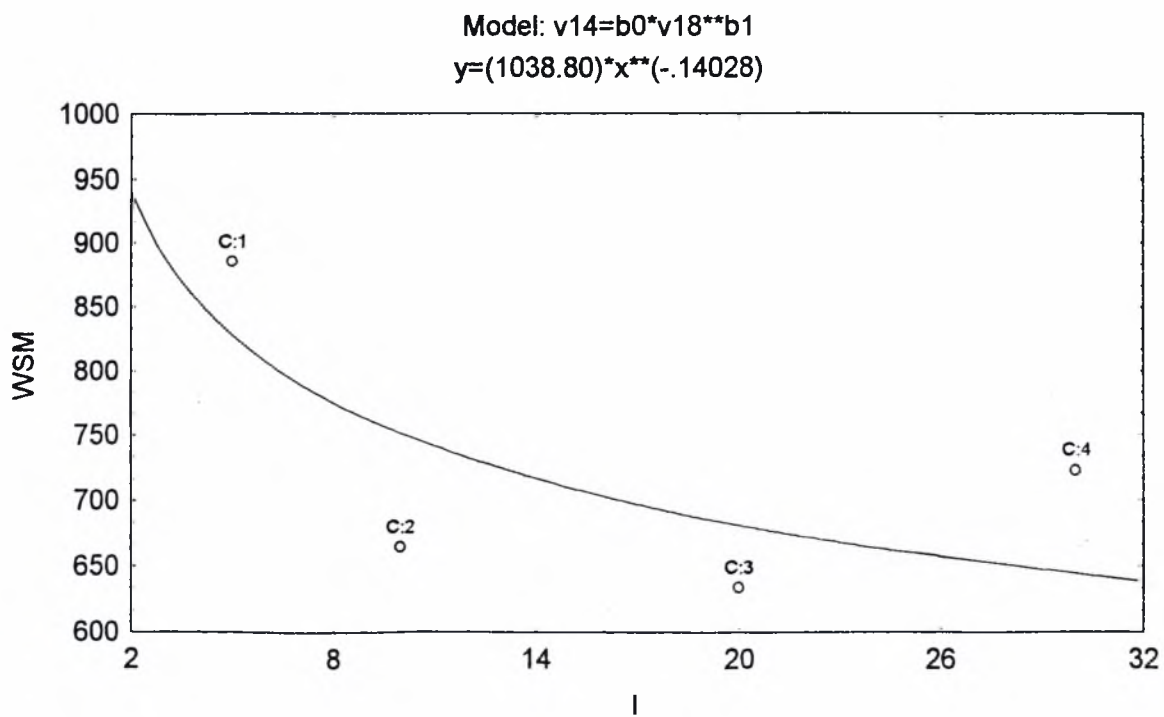
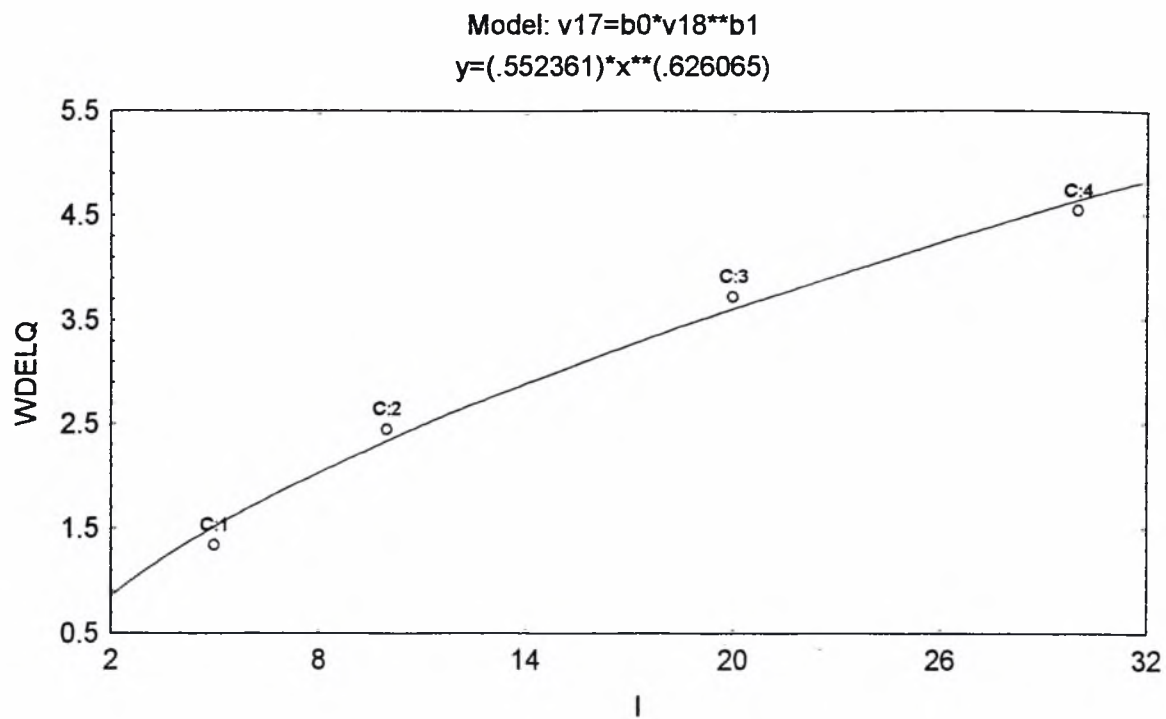


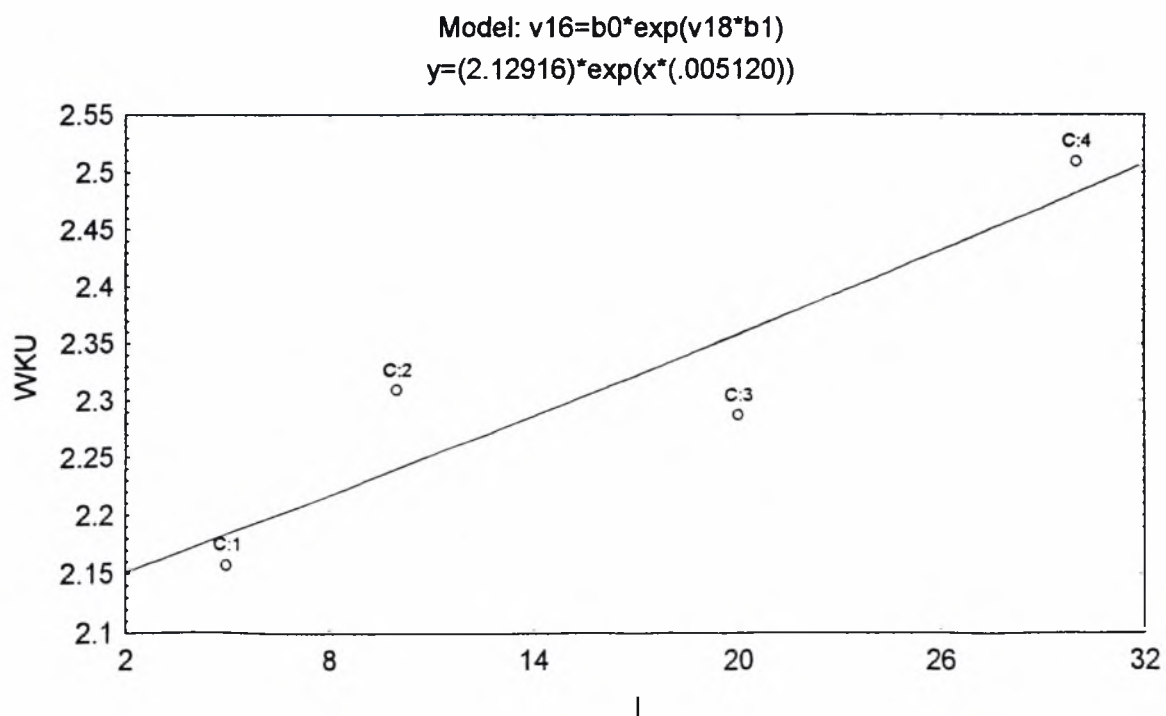
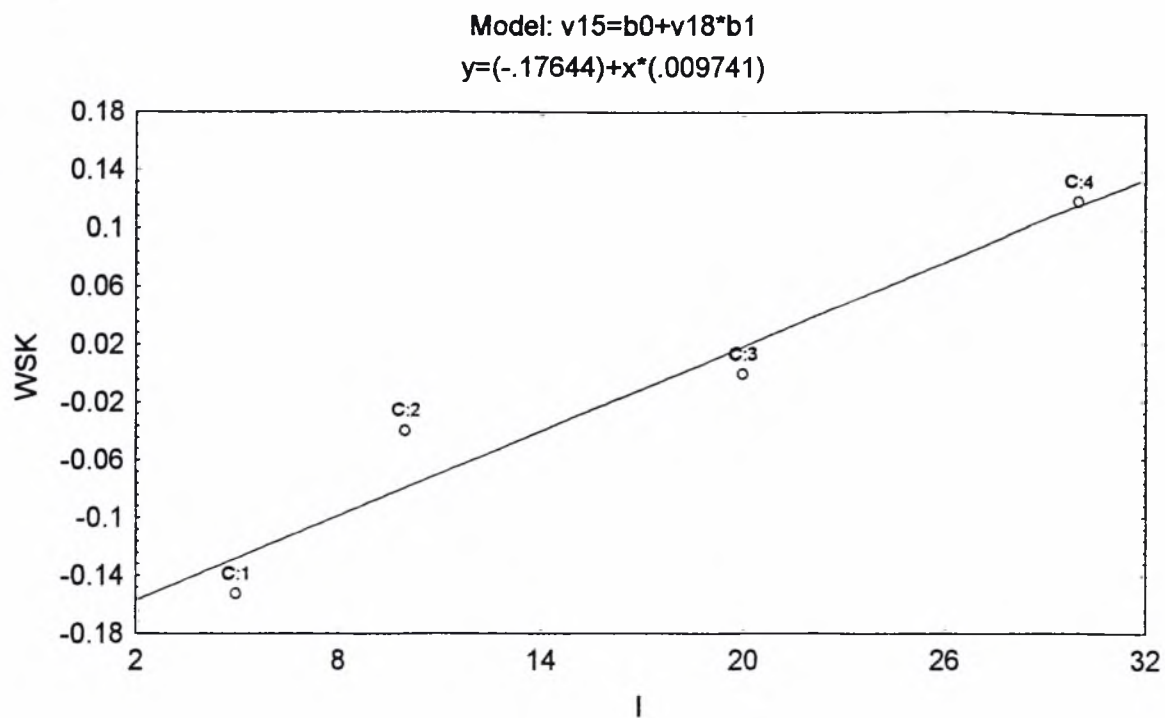














## Συμπεράσματα

Από αυτά τα απλά στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης (regression models) μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα:

1) Οι συναρτησιακές σχέσεις (μοντέλα) που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση και παρουσιάζονται στους πίνακες A, B, C, D, E, F και G, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες με κριτήριο την τιμή του συντελεστή συσχέτισης  $r$ :

- κατηγορία I, που χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν εκείνα τα μοντέλα που η τιμή του συντελεστή συσχέτισης  $r$  κυμαίνεται στο διάστημα  $0,9 \leq r \leq 1$
- κατηγορία II, που χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητική. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλα τα μοντέλα με συντελεστή  $r$  στο διάστημα  $0,8 \leq r < 0,9$ .
- κατηγορία III, που χαρακτηρίζεται ως μη ικανοποιητική. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα υπόλοιπα μοντέλα που έχουν συντελεστή  $r$  μικρότερο του 0,8:  $r < 0,8$ .

2) Όσον αφορά τις παραμέτρους επιφανειακής τραχύτητας, το μοντέλο παλινδρόμησης που πιο πολύ τις εκφράζει σε σχέση με τα  $T$  και  $I$  είναι κυρίως αυτό της ύψωσης σε δύναμη:  $y = b_0 x^{b_1}$  με τον συντελεστή  $b_0 > 0$  και τον εκθέτη  $b_1$  με τιμές  $0 < b_1 < 1$ . Οι συναρτήσεις  $y = y = b_0 x^{b_1}$  με τέτοιες τιμές παραμέτρων  $b_0$ ,

$b_1$  έχουν αρνητική δεύτερη παράγωγο  $y'' = -\frac{b_0 b_1 (1 - b_1)}{x^{2-b_1}} < 0$  και θετική πρώτη

παράγωγο  $y' = \frac{b_0 b_1}{x^{1-b_1}} > 0$ . Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνει το  $x$ , αυξάνει και το  $y$

αλλά με όλο και μικρότερους ρυθμούς. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η τραχύτητα των EDM επιφανειών αυξάνει ταχύτατα στην αρχή καθώς αυξάνονται τα  $T$  ή  $I$  αλλά στην συνέχεια οι ρυθμοί «επιδείνωσης» της ποιότητας επιφάνειας πέφτουν. Έτσι επιβεβαιώνονται πειραματικά τα όσα εκτέθηκαν στο κεφ. II (δες σχ. II.1.2 a, b, II.1.5 a,b, II.1.8, II.1.9.a,b κλπ.)

3) Όσον αφορά τις παραμέτρους κυμάτωσης, το μοντέλο παλινδρόμησης που τις εκφράζει σε σχέση με τα  $T$  και  $I$  είναι τόσο αυτό της ύψωσης σε δύναμη  $y = b_0 x^{b_1}$  όσο και το γραμμικό  $y = b_0 + b_1 x$

4) Οι τιμές της μέσης επιφανειακής τραχύτητας  $R_a$  και του μέσου βάθους  $R_{zDIN}$  καθώς και οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων  $W_a$  και  $W_{zDIN}$  της κυμάτωσης

παρουσιάζουν, σε όλες τις περιπτώσεις, την τάση να αυξάνουν με αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής  $T$  ή  $I$ , δηλαδή οι συναρτήσεις παλινδρόμησης  $R_a = f(T)$ ,  $R_a = f(I)$ ,  $R_{zDIN} = f(T)$ ,  $R_{zDIN} = f(I)$ ,  $W_a = f(T)$ ,  $W_a = f(I)$ ,  $W_{zDIN} = f(T)$ ,  $W_{zDIN} = f(I)$  είναι γνησίως αύξουσες. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με το γεγονός ότι αύξηση του ρεύματος  $I$  ή του χρόνου  $T$  του παλμού (της εκφόρτισης) άρα και της ενέργειας παλμού, προκαλεί εξάπλωση των ορίων των ισόθερμων καμπυλών οι οποίες εισδύουν στο υλικό γύρω από το σημειακό ίχνος του δίαυλου του πλάσματος και διαμέσω των οποίων η ενέργεια μεταβιβάζεται στο υλικό. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερες επιφανειακές ανωμαλίες πράγμα που μεταφράζεται σε αύξηση των εν λόγω παραμέτρων.

- 5) Αντίθετα, αντιστρόφως ανάλογη φαίνεται να είναι η εξάρτηση των τιμών της λοξότητας  $R_{SK}$  και της κύρτωσης  $R_{ku}$  με τον χρόνο  $T$ , καθώς και των αντίστοιχων παραμέτρων κυμάτωσης  $W_{sm}$ ,  $W_{SK}$ ,  $W_{ku}$  με τον χρόνο  $T$ , για τις τελευταίες ιδίως για μικρές τιμές του ρεύματος  $I$ . Έτσι αύξηση του χρόνου παλμού (ή χρόνου εκφόρτισης)  $T$ , προκαλεί μείωση κυρίως της λοξότητας  $R_{SK}$  και της κύρτωσης  $R_{ku}$ . Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι αύξηση του χρόνου παλμού (ή χρόνου εκφορτίσεως, όπως τον έχουμε αναφέρει και άλλου σε αυτή την εργασία) αυξάνει την ποσότητα του αφαιρούμενου υλικού από εκκένωση καθώς και το βάθος της θερμοκρασίας τήξεως (δες και διαγράμματα σχ. II.1.2 σελ. 13 και σχ. II.1.5α σελ. 16 του παρόντος). Αυτό οδηγεί σε επιφάνειες «άδειες από υλικό» και επιφάνειες με οξύτητα προεξοχών, κάτι που αντανakλά άμεσα στις τιμές του  $R_{ku}$  και  $R_{SK}$ .
- 6) Το γεγονός ότι οι παράμετροι κυμάτωσης αυξάνουν, και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις αναλογικά, με αύξηση των παραμέτρων κατεργασίας (χρόνου και ρεύματος), υποδηλώνει αύξηση έντασης της εξαναγκασμένης ταλάντωσης μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου εργασίας.
- 7) Παρατηρούμε ότι στους τέσσερις πρώτους πίνακες A, B, C, D όπου σχετίζονται οι παράμετροι επιφάνειας με τον χρόνο  $T$ , παρουσιάζεται αύξηση των παραμέτρων (μοντέλων) που ανήκουν στην κατηγορία I καθώς αυξάνει η τιμή του ρεύματος (που είναι η παράμετρος κατεργασίας EDM). Αντιθέτως στους πίνακες E, F, G όπου σχετίζονται οι παράμετροι επιφάνειας με το ρεύμα  $I$ , ο αριθμός των μοντέλων που ανήκουν στην κατηγορία I, παραμένει σταθερός καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου κατεργασίας EDM που είναι ο χρόνος. Αυτό αποδεικνύει ότι τελικά το ρεύμα  $I$  σχετίζεται (επηρεάζει) πολύ πιο έντονα τις παραμέτρους τραχύτητας και κυμάτωση από ότι ο χρόνος  $T$ . Αυτό επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση διμεταβλητών μοντέλων που πραγματοποιήσαμε (παρ. III.3.2) όπου οι συντελεστές του  $I$  είναι (πολύ) μεγαλύτεροι από τους συντελεστές του  $T$ .

- 8) Οι παράμετροι κυμάτωσης  $W_a$ ,  $W_{zDIN}$ ,  $W_{DelQ}$  ανήκουν σταθερά στην κατηγορία I και στους 7 πίνακες και μάλιστα με πολύ υψηλές τιμές συσχέτισης ( $r \cong 0,999$ ). Το ίδιο ισχύει και για την παράμετρο τραχύτητας  $R_{Sm}$ . Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζουν υψηλότερη συσχέτιση (εξάρτηση) με τον χρόνο και το ρεύμα. Αντίθετα, οι παράμετροι  $W_{Sm}$ ,  $W_{Sk}$ ,  $W_{ku}$  και  $R_{DelQ}$  παρουσιάζουν λίγες εμφανίσεις στην κατηγορία I πράγμα που δείχνει ότι η τιμή τους επηρεάζεται λιγότερο ή και ελάχιστα από τις μεταβολές του χρόνου ή / και του ρεύματος. Και βέβαια η παράμετρος με την μικρότερη συσχέτιση έναντι των I και T είναι η  $W_{ku}$ .

### **III.3.2. ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ**

Στην συνέχεια θα προσπαθήσουμε να βρούμε ορισμένα στατιστικά πολυμετάβλητα μοντέλα παλινδρόμησης. Έτσι επιλέγουμε κάποιες από τις παραμέτρους τραχύτητας και κυμάτωσης, ας πούμε τις:

- $R_a$ , μέση αριθμητική τραχύτητα
- $R_{Sm}$ , μέση απόσταση μεταξύ των κορυφών
- $R_{Sk}$ , λοξότητα
- $R_{delQ}$  μέση τιμή τετραγώνων τοπικών κλίσεων
- $W_a$  μέση αριθμητική κυμάτωση

και θα επιδιώξουμε να προσδιορίσουμε κάποιες εμπειρικές συναρτήσεις αυτών των παραμέτρων σε σχέση με τις παραμέτρους EDM κατεργασίας, ήτοι το ρεύμα παλμού I, τον χρόνο παλμού (ή εκφόρτισης) T και το γινόμενο  $I \times T$  που προσεγγιστικά παριστάνει την ενέργεια W του παλμού.

Προς τούτο παίρνουμε πάλι τους 4 πίνακες (πίνακας 4, πίνακας 5, πίνακας 6 και πίνακας 7) από πριν (πίνακες 3 x 18 που περιέχουν τους μέσους όρους των αρχικών μετρήσεων) προσθέτω μια 19<sup>η</sup> στήλη με τις τιμές του χρόνου T παλμού (τα 100, 300, 500  $\mu\text{sec}$ ) και ενσωματώνω και τους 4 αυτούς πίνακες σε έναν μεγάλο πίνακα διαστάσεων 12x19 πλέον. Από αυτόν παίρνω τιμές και με την βοήθεια του εμπορικού λογισμικού (πρόγραμμα STATISTIKA) προχωρώ σε δοκιμές για να προσδιορίσω μια εμπειρική σχέση της μορφής  $R_a = f(I, T, I \times T)$ . Το ίδιο κάνω και με τις υπόλοιπες παραμέτρους τραχύτητας / κυμάτωσης που έχω επιλέξει πιο πάνω. Στην συνέχεια δίνω τις συναρτήσεις και τις καμπύλες που έχουν προκύψει:

#### **α) Συναρτήσεις**

Οι μη – γραμμικές πολυμεταβλητές εξισώσεις που προέκυψαν, είναι οι κάτωθι:

$$1) R_a = b_0 \times T + b_1 \times I + b_2 \times (T \times I)^{b_3} \mu\epsilon$$

$$b_0 = -0,008, \quad b_1 = -0,163, \quad b_2 = 0,762 \quad b_3 = 0,341$$

$$\text{και} \quad r^2 = 0,97267$$

$$2) R_{Sm} = b_0 \times T + b_1 \times I + b_2 \times (T \times I)^{b_3} \mu\epsilon$$

$$b_0 = 0,048, \quad b_1 = 0,872, \quad b_2 = 35,712 \quad b_3 = 0,214$$

$$\text{και} \quad r^2 = 0,9748$$

$$3) R_{Sk} = b_0 \times (T^{b_1}) + b_2 \times (I^{b_3}) + b_4 \mu\epsilon$$

$$b_0 = -6,581, \quad b_1 = 0,011, \quad b_2 = 9,713 \quad b_3 = 0,031 \quad b_4 = -3,237$$

$$\text{και} \quad r^2 = 0,83708$$

$$4) R_{delQ} = b_0 \times T + b_1 \times I + b_2 \times (T \times I)^{b_3} \mu\epsilon$$

$$b_0 = -0,02, \quad b_1 = -0,247, \quad b_2 = 3,028 \quad b_3 = 0,292$$

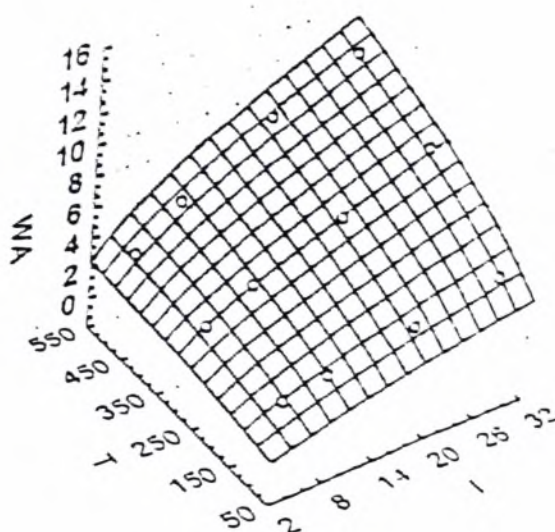
$$\text{και} \quad r^2 = 0,787$$

$$5) W_a = b_1 \times I + b_2 \times (T \times I)^{b_3} \mu\epsilon$$

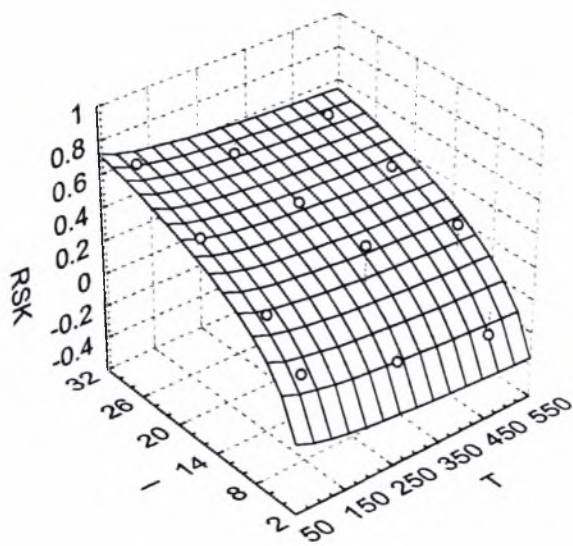
$$b_1 = 0,052, \quad b_2 = 0,04 \quad b_3 = 0,58$$

$$\text{και} \quad r^2 = 0,9814$$

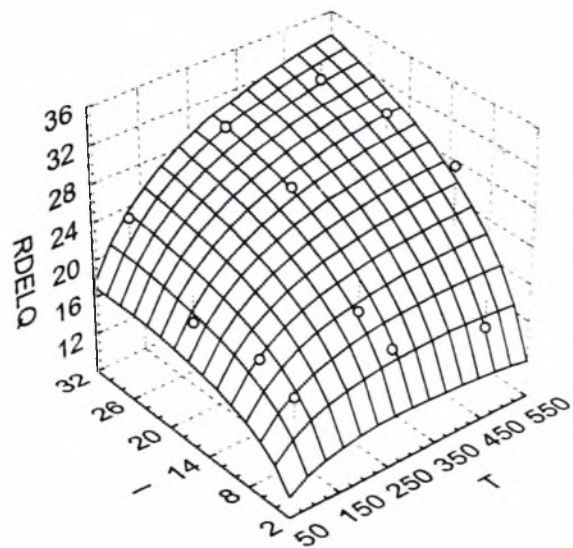
## β) Καμπύλες



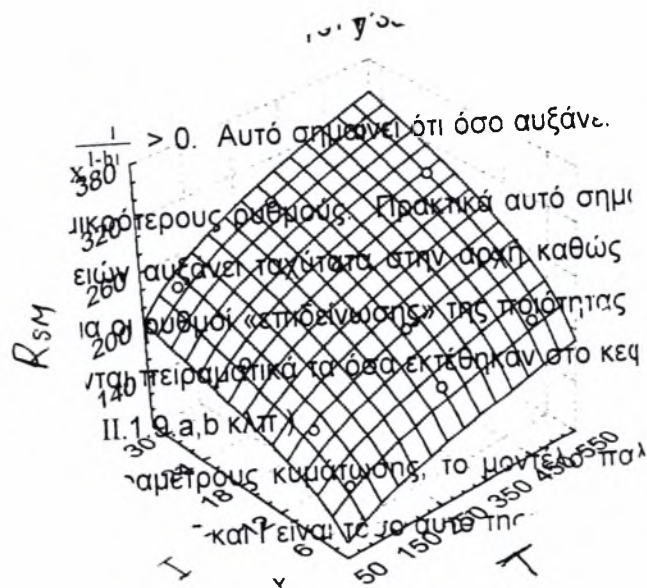
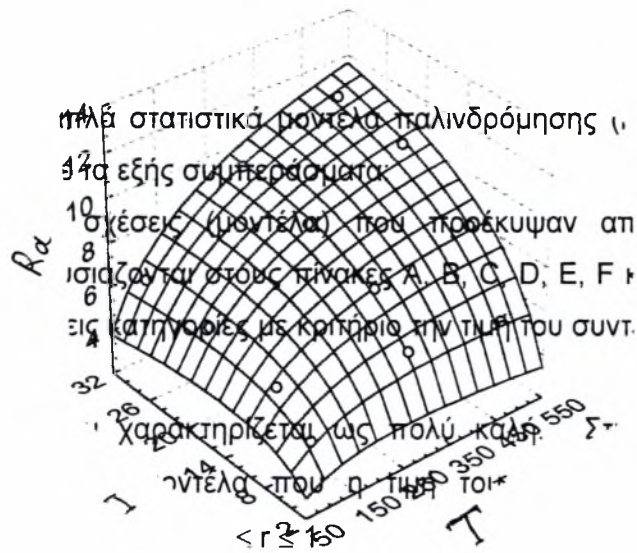
Model:  $v_6=b_0(v_{18}^{b_1})+b_2(v_{19}^{b_3})+b_4$  with  $R^2=0,83708$   
 $R_{sk} = - 6.581 \times T^{0.011} + 9.713 \times I^{0.031} - 3.237$



Model:  $v_8=b_0v_{18}+b_1v_{19}+b_2(v_{18}v_{19})^{b_3}$  with  $R^2=0,787$   
 $R_{delQ} = - 0.02 \times T - 0.247 \times I + 3.028 \times (T \times I)^{0.292}$







### γ) Συμπεράσματα

Γενικώς παρατηρείται υψηλή συσχέτιση ( $r \approx 1$ ) των ως άνω παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης με τον χρόνο και το ρεύμα και το γινόμενο τους (που εκφράζει την ενέργεια παλμού). Επιμέρους παρατηρήσεις που μπορούμε να κάνουμε είναι οι κάτωθι:

α) Η υψηλή εξάρτηση της  $R_{Sm}$  από την ενέργεια παλμού (ο συντελεστής  $b_2$  στην εξίσωση 2 έχει πολύ μεγαλύτερες τιμές από τους  $b_0$  και  $b_1$ ). Αυτό επιβεβαιώνει και τις σχέσεις II.4 και II.5 σελ. 15 όπου το βάθος και η διάμετρος κρατήρα εξαρτώνται από την ενέργεια παλμού με σχέσεις εκθετικής μορφής. Έτσι μεγάλη ενέργεια παλμού δίνει μεγαλύτερους και βαθύτερους κρατήρες άρα μεγαλώνουν οι αποστάσεις των κορυφών του περιγράμματος της EDM επιφάνειας μεταξύ των, άρα μεγαλώνει και το  $R_{Sm}$  (δες και σχ. II.1.10 σελ. 23).

β) Η υψηλή εξάρτηση της  $R_{Sk}$  από το ρεύμα παλμού  $I$  αλλά και η έλλειψη εξάρτησής της από την ενέργεια παλμού.

γ) Η εξάρτηση της  $R_a$  πιο πολύ από την ενέργεια παλμού και λιγότερο από τα  $I$ ,  $T$ .

δ) Η έλλειψη εξάρτησης της  $W_a$  από τον χρόνο παλμού  $T$ .

### III.4. ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η ηλεκτροδιάβρωση παράγει επιφάνειες οι οποίες είναι στοχαστικώς αποπροσανατόλιστες, δηλαδή επιφάνειες όπου η φθορά δεν έχει προτίμηση προς κάποια διεύθυνση (ισοτροπία). Στην συγκεκριμένη εργασία δείχνουμε ότι η EDM παράγει ισότροπες επιφάνειες όσον αφορά τις παραμέτρους τραχύτητας και κυμάτωσης με δυο τρόπους:

α) Παίρνοντας στοιχεία από τον πίνακα Hlekt~1.xls τις αρχικές 50x17x12 μετρήσεις των παραμέτρων, δημιουργώ τις καμπύλες Fisher – Pearson για τα δοκίμια με συνθήκες EDM κατεργασίας της:  $I = 5A/T = 100\mu\text{sec}$ ,  $I = 5A / T = 500\mu\text{sec}$ ,  $I = 20A/T = 100\mu\text{sec}$ ,  $I = 20A/T = 300\mu\text{sec}$  και  $I = 30A / T = 300 \mu\text{sec}$  (τυχαία επιλογή δοκιμών). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι αντίστοιχες καμπύλες Fisher – Pearson, των κατανομών των παραμέτρων επιφανειακής δομής των δοκιμίων έχουν την μορφή κώδωνος. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει συμμετρία των επιφανειών πάνω και κάτω από την κεντρική γραμμή αυτών πράγμα που σημαίνει ότι έχουμε γεωμετρική ισοτροπία.

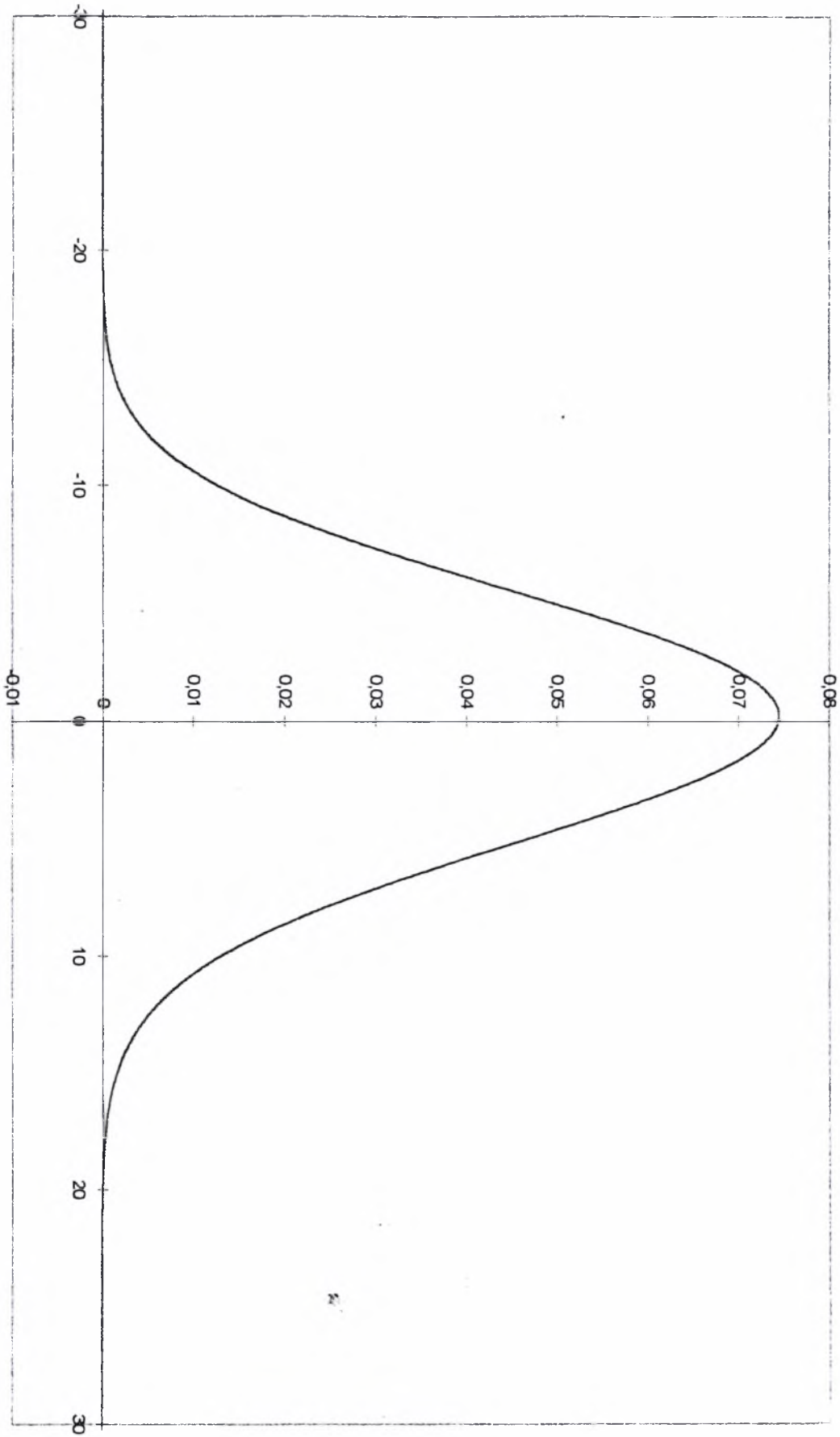
β) Με πειραματική επιβεβαίωση. Προς τούτο σε δυο από τα 12 δοκίμια που διαθέτουμε (αυτά με παραμέτρους κατεργασίας  $I=5A/T = 500\mu\text{sec}$  και  $I = 20 A/T = 500 \mu\text{sec}$ ) κάναμε πέντε (5) μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας / κυμάτωσης ανά  $45^\circ$  περιστροφής, δηλαδή 5 μετρήσεις στην διεύθυνση των  $0^\circ$ , 5 μετρήσεις στις  $45^\circ$ , 5 μετρήσεις στις  $90^\circ$  και 5 μετρήσεις στις  $135^\circ$ , σύνολο 5 μετρήσεις  $\times$  4 θέσεις  $\times$  2 δοκίμια = 40 μετρήσεις. Χάριν συντομίας ονομάζω κάθε μέτρηση με τον κωδικό ITθn όπου  $I$  = το ρεύμα κατεργασίας (εδώ  $I = 5$  και  $20A$ ),  $T$  = ο χρόνος κατεργασίας ( $T = 500$ ),  $\theta$  η διεύθυνση μέτρησης (εδώ  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , και  $135^\circ$ ) και  $n$  = ο αριθμός της μέτρησης (εδώ  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ).

Όπως φαίνεται από τους πίνακες 1 και 2 που παρουσιάζουν ομαδοποιημένες τις μετρήσεις αυτές, οι τιμές που μετρήσαμε δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους με αλλαγή της διεύθυνσης μέτρησης και αυτό επιβεβαιώνει την ισοτροπία των επιφανειών.

Ακολουθούν οι καμπύλες Fisher – Pearson και οι πίνακες 1 και 2 που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους.

5100 Chart 2

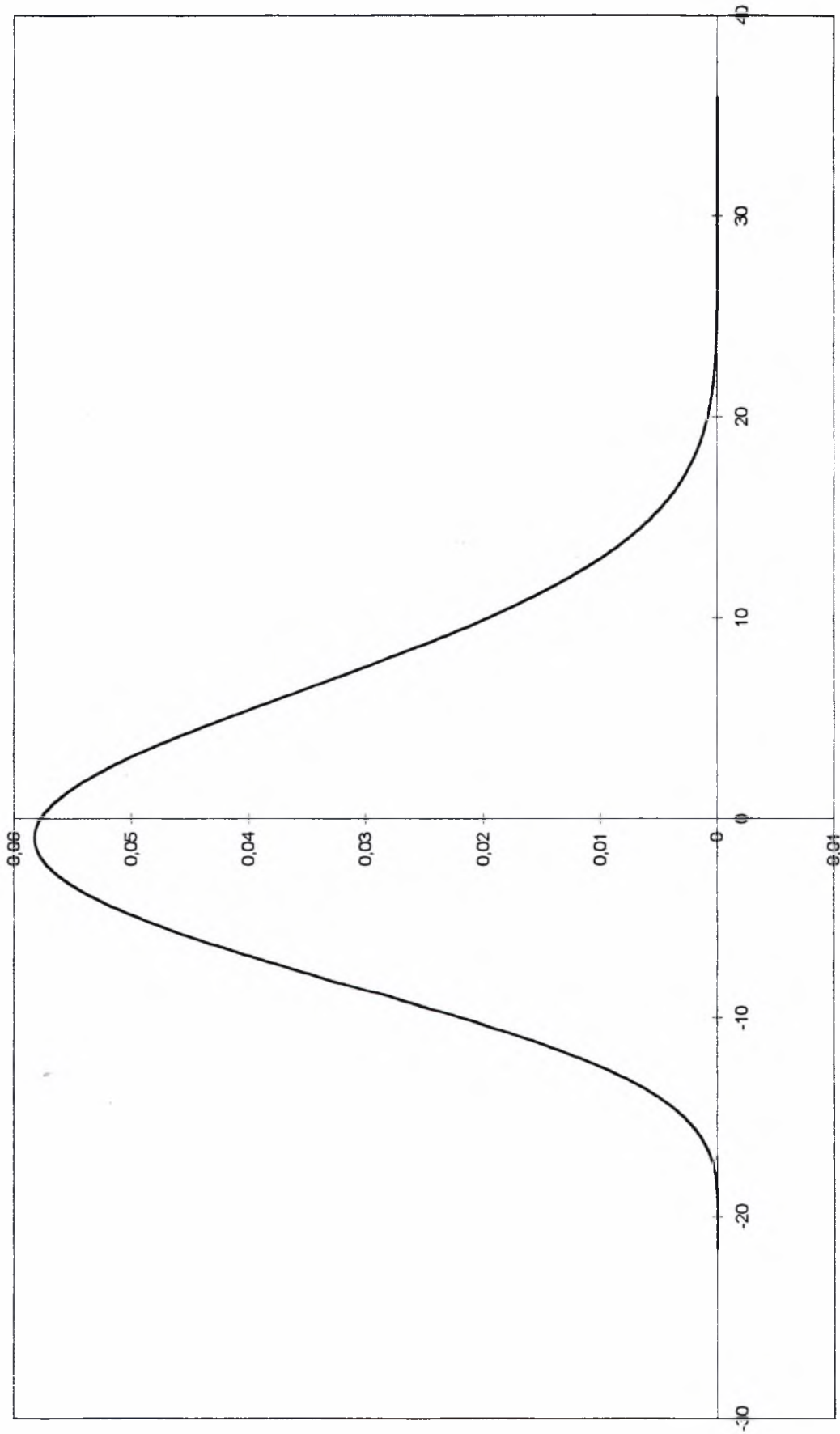
F-P curve l=5 T=100



Σελiδα 1

5500 Chart 4

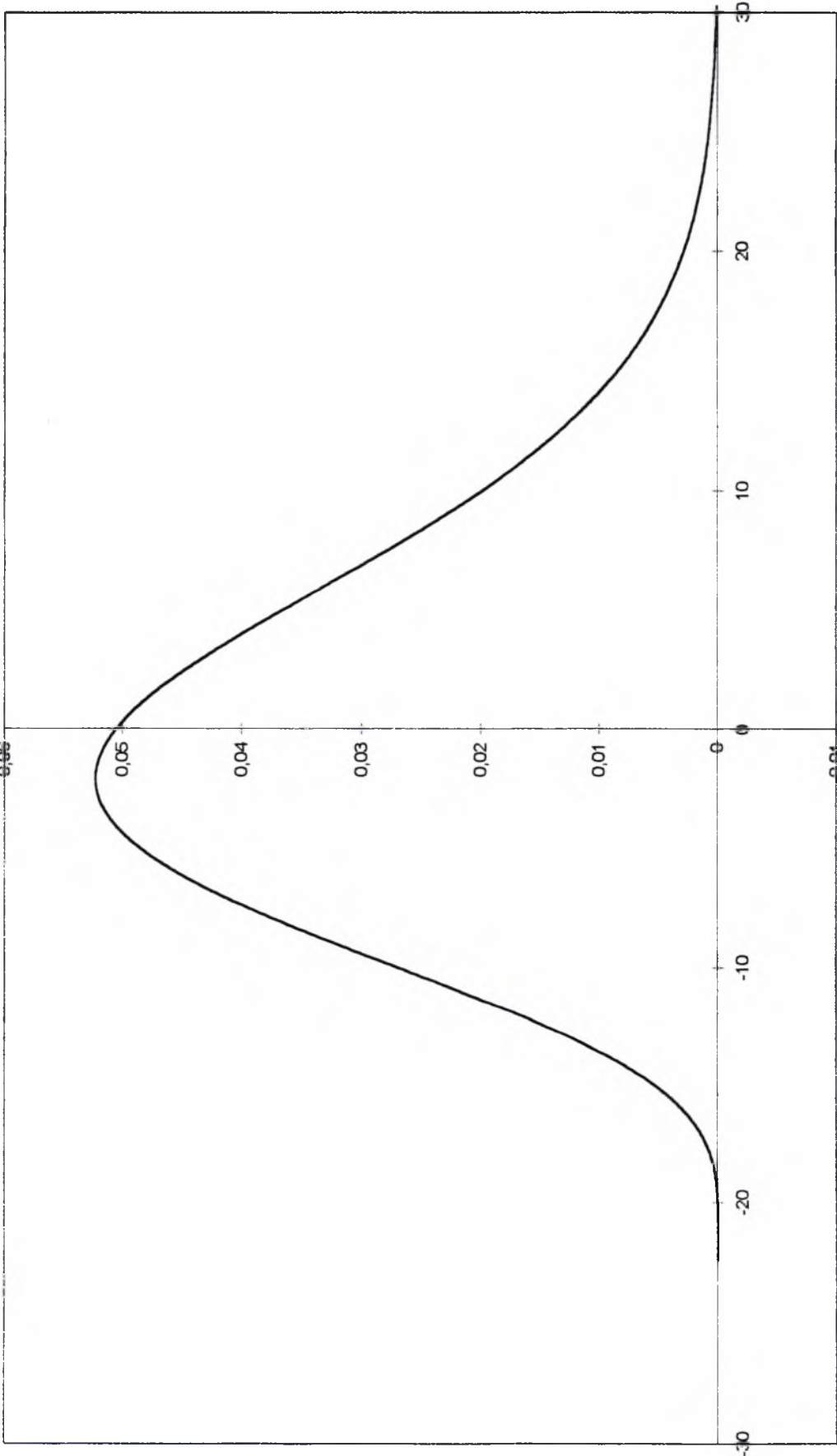
F-P curve I5 T500



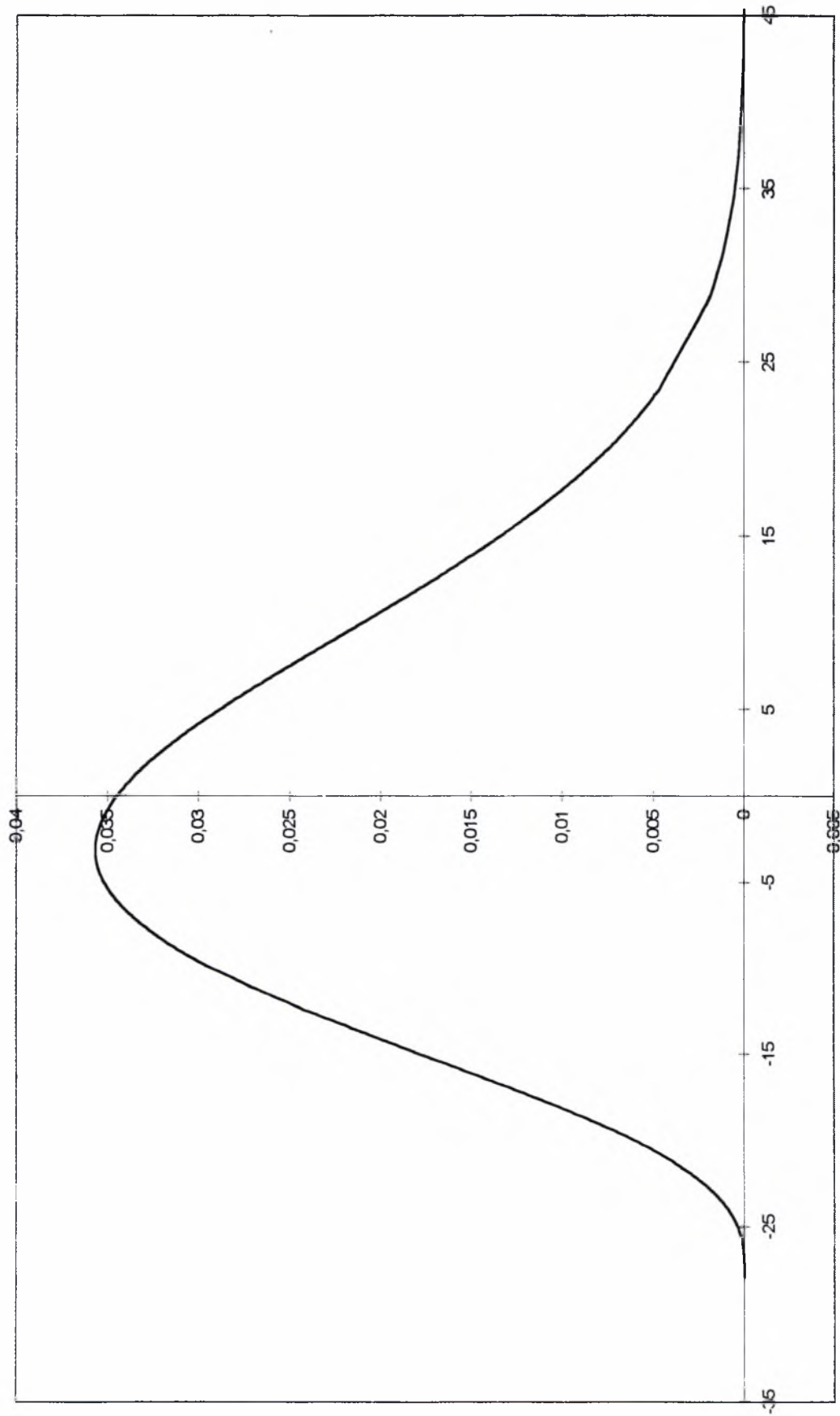


20100 Chart 7

F-P curve l=20 T=100

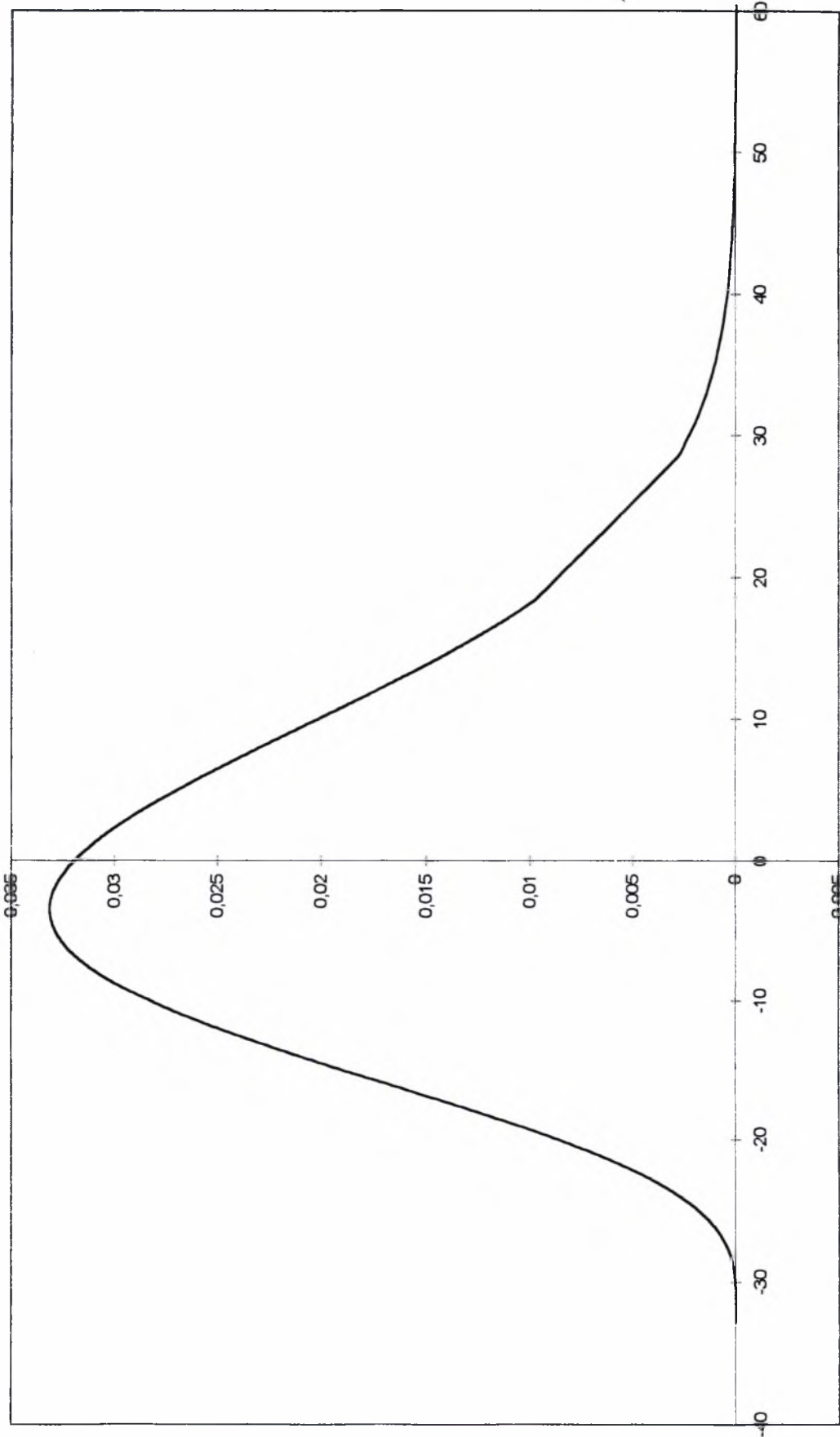


F-P curve l=20 T=300



30300 Chart 1

F-P curve  $l=30$   $T=300$



Πίνακας 1 Τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυμάτωσης για συνθήκες κοπής l=20Α και T=500μs σε 4 διαφορετικές διευθύνσεις (ανα 45°)

MEASURE	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>zDIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>Sm</sub>	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>Deia</sub>	R <sub>y</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>zDIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>Sm</sub>	W <sub>sk</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>Deia</sub>
20500 01	13,1	99,2	66,5	52,2	326	0,434	4,06	27,8	47	16,9	94,5	49,5	65,6	1415	1,4	4,41	6,4
20500 02	12,2	82,9	56	48,6	280	0,353	2,78	29,8	34,2	14,6	64,4	39,1	41,1	1788	0,857	2,64	4,82
20500 03	13,4	102	67,3	47,1	273	0,229	3,38	32,3	55,4	20	82,2	45,1	46,1	969	0,354	2,05	5,79
20500 04	11,2	68,4	52,1	38	399	0,629	2,73	27,6	30,4	11,9	56,5	27,9	26	2210	-0,474	2,38	3,92
20500 05	16,2	83,8	66,8	41,5	440	0,39	2,23	30,4	42,2	19,1	94,6	49,4	46,1	1936	-0,128	2,41	5,87
20500451	12,9	92,5	59,3	49	221	0,207	3,33	32,2	43,5	19,5	74,2	39,6	40,8	2029	0,323	1,86	5,68
20500452	12	74,2	55,1	41,1	246	0,658	3,09	32	33,1	9,1	41,1	29,7	19,5	960	-0,312	2,11	3,82
20500453	12,3	86,8	58,5	43,9	347	0,325	3,03	30	43	11	57,6	30,4	30	703	-0,164	2,6	3,81
20500454	14,8	79,6	66,9	44,5	341	0,175	2,23	31,9	35,1	8,69	46,4	25,9	28,4	748	0,898	3,18	4,24
20500455	13,7	75,7	59,3	41,9	386	0,518	2,61	30,8	33,8	28,8	112	57,1	66	1378	0,242	1,94	5,99
20500901	12,1	68,2	53,1	35,6	295	0,371	2,58	30	32,6	15,9	68,7	41,3	30,7	1359	-0,16	2,07	5,68
20500902	12	67,5	52,6	39,2	321	0,445	2,55	30,3	28,3	15,4	82,1	36	39,8	1331	0,195	2,73	5,28
20500903	11,7	61,9	49,4	30,8	285	0,238	2,06	30,8	31,1	14,9	75,2	35,4	43,5	1523	0,689	2,83	4,11
20500904	10,1	74,4	49,1	38,9	429	0,824	3,52	28,6	35,5	9,71	51,3	26,4	36,6	1245	1,52	4,36	3,87
20500905	9,42	82,6	51,3	46	245	0,799	4,45	30,1	36,7	12,9	61	28,5	26,5	1537	-0,717	2,56	3,96
20500131	8,83	48	41,3	26	221	0,578	2,57	29,1	22	17,2	68,5	36,8	41,1		0,794	2,28	3,77
20500132	11,3	75,3	46,2	46,3	344	0,538	3,52	28,1	28,9	19,5	66,1	36,5	37,8	2216	0,302	1,64	4,14
20500133	14,4	76,1	59,3	47,3	336	0,681	2,76	32,6	28,8	11	58,1	38,3	22,7	850	-0,804	3,14	5,56
20500134	11,3	86,2	49,5	40,2	282	0,0725	3,56	28,8	46	10,9	62,4	21,3	48,5	2470	1,97	5,71	4,6
20500135	12,4	67,1	52,5	37,3	332	0,302	2,35	29,3	29,9	11,9	52,7	31,2	28,9	1357	0,316	2,09	4,05

**Πίνακας 2** Τιμές των παραμέτρων τραχύτητας και κυράτωσης για συνθήκες κοπής I=5A και T=500μs σε 4 διαφορετικές διευθύνσεις (ανα 45°)

MEASURE	R <sub>a</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>z-DIN</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>gsm</sub>	R <sub>ak</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>Delta</sub>	R <sub>y</sub>	W <sub>a</sub>	W <sub>t</sub>	W <sub>z-DIN</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>gsm</sub>	W <sub>ak</sub>	W <sub>ku</sub>	W <sub>Delta</sub>
5500 01	6,49	39,6	30,3	14,2	251	-0,618	2,9	16,4	25,4	7,46	25,6	11,9	14,5	2426	0,277	1,61	1,72
5500 02	4,53	29	22,5	12,9	230	-0,0392	2,77	12,8	16,1	3,57	16	9,46	9,44	1643	0,713	2,6	1,19
5500 03	5,29	28,3	24,9	12	225	-0,576	2,63	15	16,3	2,85	12,3	6,57	6,16	1277	0,131	1,98	1,13
5500 04	4,89	36	27,7	13,8	171	-0,701	3,57	15	22,3	3,16	12	8,36	5,4	1529	-0,27	1,84	1,36
5500 05	5,41	33	24,5	16	228	-0,248	2,68	14,7	17	2,9	12,3	8,48	7,6	947	0,305	2,04	1,13
5500 451	4,85	28,8	25,3	12,9	210	-0,245	2,65	13,4	15,9	4,35	17,8	7,46	7,01	2406	-0,406	2,01	1,21
5500 452	4,85	31,9	25,6	15,8	176	-0,238	2,72	14,6	16	1,61	9,54	5,18	4,4	853	-0,282	3,02	0,761
5500 453	5,85	35,3	27,1	17	194	-0,328	2,68	15,5	18,4	2,31	12,9	7,76	5,37	782	-0,827	3,34	1,21
5500 454	4,46	27,1	22,3	12,2	239	-0,262	2,63	13,2	14,9	3,45	14,8	9,65	9,41	1642	0,957	2,78	1,15
5500 455	5,96	30,9	27,2	15,9	181	-0,0355	2,22	15,2	15	1,93	11,6	5,78	6,84	1007	0,521	2,96	1,09
5500 901	6,16	39,3	30,2	17,7	197	-0,206	2,82	16,2	21,6	2,33	12,4	7,65	5,31	904	-0,336	2,84	1,2
5500 902	5,6	42,5	30,4	18	204	-0,481	3,3	15,9	24,6	5,33	20	9,62	10,2	2499	0,0844	1,69	1,27
5500 903	6,49	41	30	18,2	204	-0,242	3,11	16,1	22,7	2,72	13,3	8,07	7,23	899	0,24	2,52	1,2
5500 904	5,87	36,5	30,8	19,2	168	-0,0178	2,69	16,3	17,3	4,47	19,1	9,15	6,91	1387	-0,785	2,54	1,29
5500 905	5,45	31,7	25,4	13,5	179	-0,373	2,55	15,9	18,2	2,29	10,6	6,26	4,29	1052	-0,605	2,4	1,16
55001351	6,45	32,6	30,2	14,5	282	-0,127	2,27	15	18,1	4,07	19	11,3	8,7	966	-0,245	2,24	1,65
55001352	5,6	30,9	26,2	14,9	187	0,15	2,41	15,4	16,1	3,69	15,4	10,7	8,16	1540	0,0169	2	1,37
55001353	5,96	31	24,5	14	244	-0,448	2,33	14,3	17	2,79	12	5,63	6,37	1087	0,166	2,14	1,04
55001354	5,1	34,4	28,1	14,4	187	-0,401	3,04	15,9	20	2,81	14,3	6,79	6,74	1327	-0,233	2,59	0,964
55001355	5,4	37,3	28,5	13,4	182	-0,654	3,59	14,4	23,9	2,93	13,9	9,45	6,57	766	-0,224	2,19	1,4



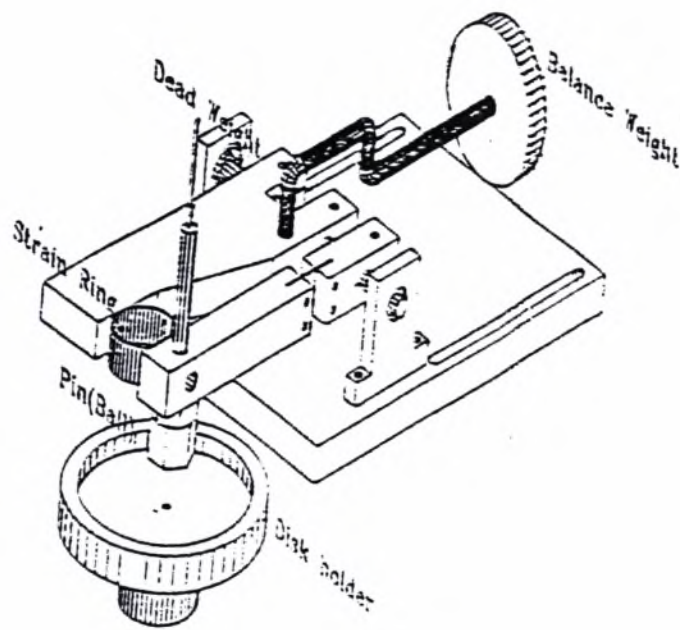
## IV. ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ – ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### IV.1. ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση του πειραματικού μέρους μετρήσεων της τριβής και της φθοράς, θα θέλαμε να δώσουμε μερικά στοιχεία σχετικά με τα φαινόμενα αυτά. Η φθορά λοιπόν που μετράμε στα εν λόγω πειράματα είναι **φθορά πρόσφυσης** όπου δηλαδή η καταστροφή προκαλείται από δυο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους υπό φορτίο και σε σχετική κίνηση χωρίς την έκδηλη παρουσία λειαντικού μέσου. Πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν την άποψη ότι τα χαρακτηριστικά της τριβής και της φθοράς των μετάλλων επηρεάζονται κυρίως από την πρόσφυση των επιφανειών που είναι σε επαφή. Αυτή είναι η θεωρία της πρόσφυσης (adhesion theory, Bowden and Taylor 1954, Rabinowicz 1980) σύμφωνα με την οποία η τριβή δημιουργείται από την δύναμη που απαιτείται για να σπάσουν οι δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειακών ατόμων των σωμάτων στα σημεία που ακουμπούν οι προεξοχές τους καθώς κυλιούνται. Σε αντίθεση με αυτή την θεωρία, υπάρχει μια άλλη σχολή σκέψης η οποία υπογραμμίζει την σημασία της μηχανικής αλληλεπίδρασης όπως είναι η άροση, που προκαλείται από τα σκληρά ψήγματα φθοράς και τις προεξοχές των επιφανειών, σαν τον βασικό μηχανισμό της τριβής και της φθοράς (plowing theory, Fleming and Suh 1977, Suh et al. 1980, Kim and Suh 1993).

Από πειράματα που έγιναν σε δοκίμια από χάλυβα SM45C, ορείχαλκο και ντουραλουμίνιο προήλθαν πολλές χρήσιμες πληροφορίες για την τριβή και την φθορά [13]. Τα δοκίμια είχαν την μορφή δίσκου και κατεργάσθηκαν με τόρνο NC υπό μεγάλο εύρος συνθηκών κοπής (ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής είδος κοπτικού εργαλείου, ύπαρξη ή όχι ψυκτικού, ταχύτητα τροφοδοσίας κλπ.) ώστε να έχουμε δοκίμια με μεγάλες διαφορές επιφανειακής και υποεπιφανειακής παραμόρφωσης. Στον πίνακα σχ. IV.1.2a δίνονται οι συνθήκες κοπής και η χημική σύσταση των δοκιμίων ενώ στον πίνακα σχ. IV.1.2.b δίνονται οι ιδιότητες της επιφάνειάς τους [σκληρότητα Vickers (HV) και μέση επιφανειακή τραχύτητα ( $R_a$ )]. Τα πειράματα τριβής και φθοράς έγιναν με μια συσκευή με στυλίσκο σχ. IV.1.1 (pin – on – disk type apparatus) και υποβλήθησαν σε μεγάλο αριθμό κύκλων ολίσθησης (έως 22.000 για τον χάλυβα, έως 7.000 για τον ορείχαλκο και το ντουραλουμίνιο). Εκτός από τον

συντελεστή τριβής μετρήθηκε και ο όγκος φθοράς και ο συντελεστής φθοράς ανά περίπτωση. Τα σχήματα IV.1.2.a, b, IV.1.3.a,b, IV.1.4, IV.1.5.a,b, δίνουν τα σχετικά αποτελέσματα και μας οδηγούν σε αξιόλογα συμπεράσματα [13].



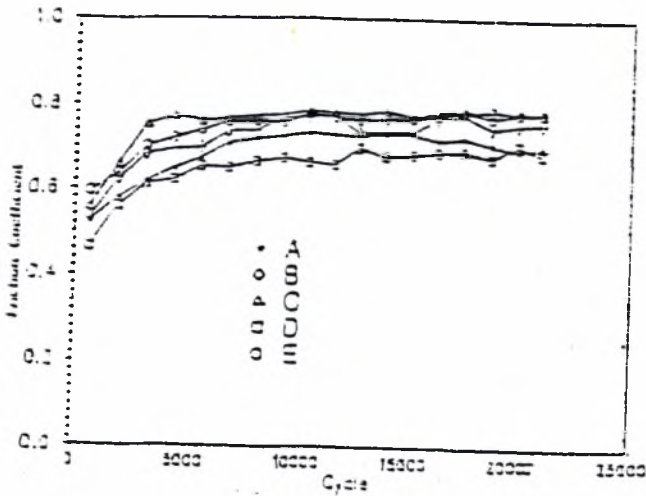
Σχ. IV.1.1. Σχηματική παράσταση της συσκευής του πειράματος τριβής και φθοράς

	SM4C				
	A	B	C	D	E
Cutting Speed(mm/min)	300	300	3	3	3
Depth of Cut(mm)	0.1	0.1	0.6	0.3	1
Type of Insert	Ceramic	Ceramic	Coated	Coated	Coated
Coolant	No	No	Yes	Yes	Yes
Feedrate(mm/min)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Chemical Composition	C: 0.2~0.45, Si: 0.15~0.25, Mn: 0.5~1.0, P: <0.015, S: <0.005				
	Brass				
	F	G		H	
Cutting Speed(mm/min)	300	300		30	
Depth of Cut(mm)	0.1	0.1		0.1	
Type of Insert	Ceramic	Ceramic		Coated	
Feedrate(mm/min)	0.05	0.05		0.05	
Coolant	No	No		Yes	
Chemical Composition	Cu: 58.0~60, Pb: 0.5~4.5, Fe: <0.5, Sn: <0.1, Zn: 0.1~0.2, Si: <0.1				
	Copper				
	I	J	K		
Cutting Speed(mm/min)	300	300	50		
Depth of Cut(mm)	0.1	0.1	0.1		
Type of Insert	Coated	Coated	Coated		
Feedrate(mm/min)	0.05	0.05	0.05		
Coolant	Yes	Yes	Yes		
Chemical Composition	Cu: 0.1~0.4, Si: <0.1, Fe: <0.1, Mn: 0.1~1.0, Ni: 0.1~0.2, Zn: <0.1, Cr: <0.1				

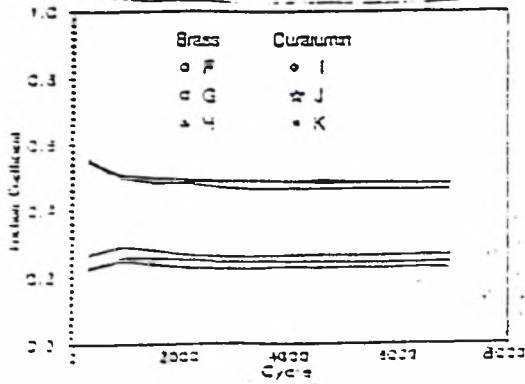
Σχ. IV.1.2.a. Συνθήκες κατεργασίας και χημική σύσταση των δοκιμών

		SM4C				
		A	B	C	D	E
Hardness(HV)		240	240	320	300	320
Roughness(Ra:μm)	Racal	0.1	0.1	0.4	0.4	0.5
	Tangential	0.11	0.04	0.16	0.20	0.16
		Brass				
		F	G	H		
Hardness(HV)		130	120	180		
Roughness(Ra:μm)	Racal	0.2	0.2	0.4		
	Tangential	0.03	0.06	0.08		
		Curalumin				
			J	K		
Hardness(HV)		140	140	160		
Roughness(Ra:μm)	Racal	0.4	0.4	0.5		
	Tangential	0.2	0.16	0.2		

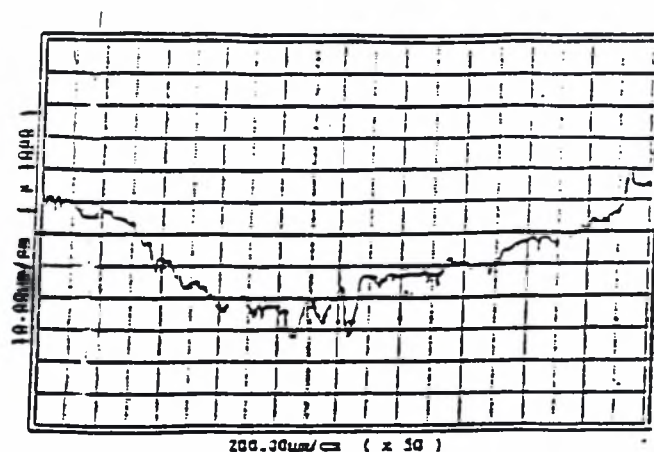
Σχ. IV.1.2.b. Επιφανειακές ιδιότητες των δοκιμών



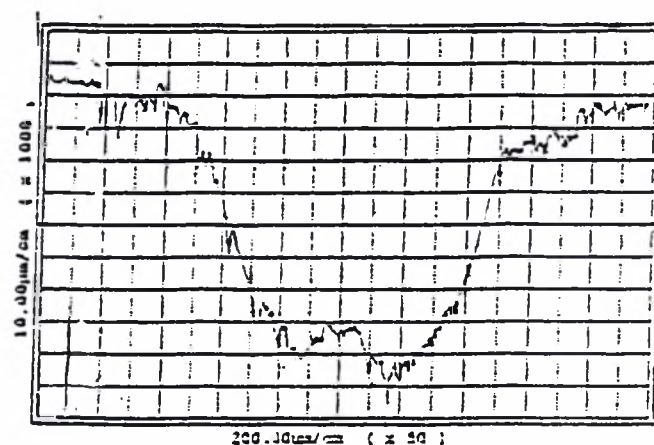
Σχ. IV.1.3.a. Συντελεστής τριβής των δοκιμών SM4C σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων τριβής



Σχ. IV.1.3.b. Συντελεστής τριβής του ορείχαλκου και του ντουραλουμινίου σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων τριβής



(a)



(b)

Σχ. IV.1.4 Προφίλ φθοράς μετά από 22.000 κύκλους για  
(a) A και (b) E δοκίμια

Brass			
Specimen	F	G	H
Hardness of Surface	HV 130	HV 120	HV 180
Wear Volume(μl)	5.1	6.7	5.7
Wear Coefficient	2.2e-3	2.7e-3	3.5e-3
Duralumin			
Specimen	I	J	K
Hardness of Surface	HV 140	HV 140	HV 160
Wear Volume(μl)	25.7	22.5	21.3
Wear Coefficient	1.2e-2	1.1e-2	1.1e-2

Σχ. IV.1.5.a. Όγκος και συντελεστής φθοράς για δοκίμια ορείχαλκου και ντουραλουμινίου

	A	B	C	D	E
Wear Volume(μl)	4.7	5.0	7.9	6.5	9.4
Wear Coefficient	1.1e-3	1.0e-3	2.5e-3	2.0e-3	3.1e-3

Σχ. IV.1.5.b. Όγκος και συντελεστής φθοράς για δοκίμια χάλυβα SM45C.

Έτσι λοιπόν μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής: [13]

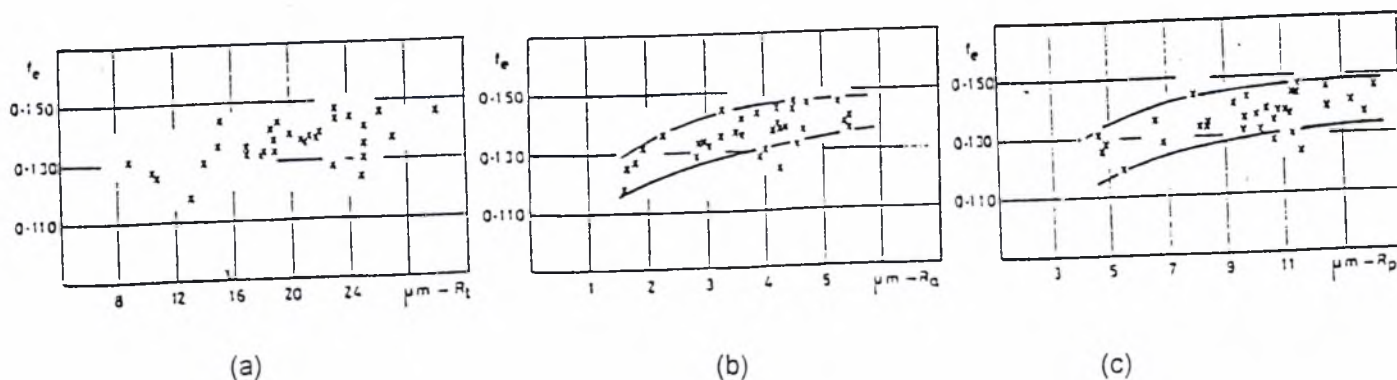
- Ο συντελεστής τριβής στον χάλυβα (σχ. IV.1.3.a) αυξάνει αρκετά σημαντικά μέχρι περίπου τους 5000 κύκλους. Αυτή η αύξηση της τριβής αποδίδεται στην αυλάκωση (άρωση) που προκαλούν τα ψήγματα φθοράς καθώς συνεχίζεται το πείραμα, ενώ γύρω στους 8.000 κύκλους ο συντελεστής τριβής λαμβάνει μια σταθερή τιμή για όλες τις περιπτώσεις. Αυτή η σταθερή τιμή κυμαίνεται σε στενά όρια (περίπου 0,1) και άρα συμπεραίνουμε ότι η τριβική συμπεριφορά των δοκιμίων δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες κατεργασίας για δοκίμια με τραχύτητα  $R_a < 1 \mu\text{m}$ .
- Κοιτάζοντας τα σχ. IV. 1.4.a και b βλέπουμε ότι το δοκίμιο (b) – που ήταν από χάλυβα κατεργασίας E – παρουσιάζει μεγαλύτερο βάθος αυλακιού από ότι το δοκίμιο (a) – χάλυβας κατεργασίας A – άρα και μεγαλύτερο όγκο φθοράς. Όμως τα δοκίμια κατεργασίας E δίνουν υψηλότερη σκληρότητα από τα A (σχ. IV.1.2.b).

Άρα είναι φανερό ότι το υλικό με υψηλότερη σκληρότητα δεν φθείρεται κατ' ανάγκην λιγότερο από τα δοκίμια με χαμηλότερη σκληρότητα. Αυτό μάλλον αποδίδεται στην χαμηλή ποιότητα επιφανείας του δοκιμίου κατεργασίας Ε σε σχέση με το δοκίμιο κατεργασίας Α (υψηλότερη ~~αυτοματοποιημένη~~ και τραχύτητα που παράγεται σε χαμηλή ταχύτητα κοπής). Άρα η ποιότητα επιφανείας μιας κατεργασμένης επιφάνειας μπορεί να είναι πιο κρίσιμη από την σκληρότητα στο να μειώνει την φθορά.

- Σύγκριση των επιφανειών (τομών) δοκιμίων κατεργασίας Β και Ε από τον χάλυβα SM45C, πριν την έναρξη του πειράματος, έδειξε ότι το δοκίμιο Ε – εν αντιθέσει προς το Β – παρουσίαζε επιφάνεια έντονα παραμορφωμένη και με πλήθος μικρορωγμές. Αυτό οδήγησε σε επιτάχυνση της φθοράς στο δοκίμιο Ε (σχ. IV.1.3.a) είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι ο συντελεστής τριβής δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη τέτοιων ρωγμών.

Είναι βέβαια πολύ ενδιαφέρον να ερευνήσουμε την επίδραση που έχουν οι παράμετροι επιφάνειας στον συντελεστή τριβής. Τα πειράματα που έκαναν οι Μ. Μ. Koura και Μ. Α. Omar με μεταλλικές επιφάνειες χαλύβδινων τριβέων και παρουσία λιπαντικού για την συσχέτιση του συντελεστή τριβής (coefficient of friction,  $f_e$ ) με τις διάφορες παραμέτρους επιφανείας έδωσαν πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα [4]: Έτσι προέκυψαν τα ακόλουθα:

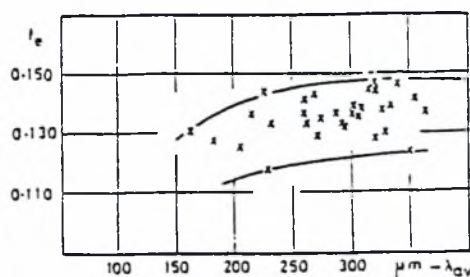
- Ο συντελεστής τριβής  $f_e$  σχετίζεται με τις παραμέτρους τραχύτητας  $R_a$  (μέση αριθμητική τραχύτητα),  $R_t$  (μέγιστο βάθος τραχύτητας) και  $R_p$  (μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή). Τα διαγράμματα που ακολουθούν σχ. IV.1.6.a,b,c δίνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Καίτοι τα σημεία είναι διασκορπισμένα, η γενική ροπή δείχνει μια αύξηση του συντελεστή τριβής με την αύξηση των παραμέτρων αυτών.



Σχ. IV.1.6 Πειραματική μεταβολή του συντελεστή τριβής  $f_e$  σε σχέση με τις (a)  $R_t$ , (b)  $R_a$  και (c)  $R_p$ .



- ii) Ο συντελεστής τριβής  $f_e$  εξαρτάται από το μέσο μήκος κύματος  $\lambda_{av}$  όπως φαίνεται στο σχ. IV.1.6.d που ακολουθεί όπου το  $f_e$  αυξάνεται με αύξηση του  $\lambda_{av}$ .



**Σχ. IV.1.6.d** Πειραματική μεταβολή του συντελεστή τριβής  $f_e$  με το μέσο μήκος κύματος τραχύτητας  $\lambda_{av}$

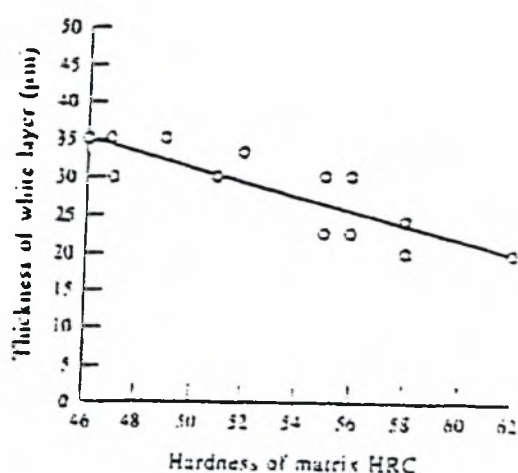
- iii) Όταν εξετάζεται ο συντελεστής τριβής, οι δύο παράμετροι τραχύτητας που αναφέραμε άνω δηλαδή η  $R_p$  και η  $\lambda_{av}$  πρέπει να εξετάζονται ταυτόχρονα. Εντούτοις, η απλή εκείνη παράμετρος επιφανείας που συσχετίζεται καλύτερα με τον συντελεστή τριβής είναι η μέση γωνία κλίσεως των επιφανειακών ανωμαλιών.
- iv) Οι άλλες επιφανειακές παράμετροι δεν επηρεάζουν τον συντελεστή τριβής.

Από την άλλη μεριά δεν πρέπει να αγνοήσουμε την επίδραση του λεγόμενου «λευκού στρώματος» στην εμφάνιση και στην έκταση της φθοράς λόγω τριβής. Ως γνωστόν οι περισσότερες μηχανουργικές κατεργασίες δημιουργούν το «λευκό στρώμα». Βέβαια όσον αφορά την τριβολογική συμπεριφορά των δοκιμών υπάρχουν δύο αντικρουόμενες απόψεις. Από την μια μεριά η σκληρυμένη επιφάνεια και η θερμική σταθερότητα του «λευκού στρώματος» θεωρείται πλεονέκτημα όσον αφορά την τριβή και την φθορά μιας επιφάνειας. Έπειτα και η βαθμιαία μεταβολή της δομής υποτίθεται ότι μεγαλώνει την αντίσταση στην φθορά. Από την άλλη μεριά όμως τα κενά και οι μικρορωγμές του «λευκού στρώματος» είναι επιζήμιες για την αντίσταση στην φθορά. Είναι γνωστό επίσης ότι μειώνονται η αντίσταση στην κόπωση και στην διάβρωση λόγω τάσεων. Πειράματα που έγιναν με δοκίμια χαμηλών κραματούχων χαλύβων μέσης – υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (0,57%C) από τα οποία άλλα είχαν «λευκό στρώμα» προερχόμενο από καταπόνηση λόγω κρούσης και άλλα δεν είχαν, έδωσαν ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις [14].

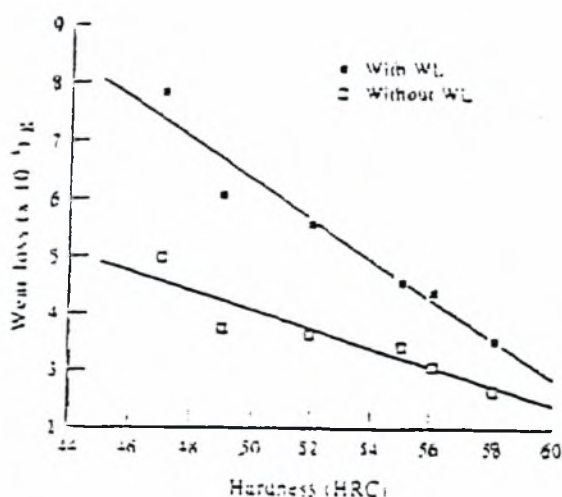
Έτσι στο σχ. IV.1.7 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ του πάχους του λευκού στρώματος και της σκληρότητας βασικού μετάλλου του δοκιμίου. Είναι εμφανές ότι το πάχος του λευκού στρώματος μειώνεται γραμμικά με την σκληρότητα. Στο σχ. IV.1.8 φαίνεται η αντίσταση φθοράς του «λευκού στρώματος». Βρέθηκε ότι υπάρχει



γραμμική σχέση μεταξύ της αντίστασης φθοράς και της σκληρότητας και για τα δύο είδη των δοκιμών με και χωρίς «λευκό στρώμα». Εντούτοις, η απώλεια φθοράς για το δοκίμιο με το «λευκό στρώμα» είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Επίσης η γραμμική κλίση για το δοκίμιο με το «λευκό στρώμα» είναι υψηλότερη. Σχετίζοντας τώρα αυτά τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του σχ. IV.1.7 βρίσκεται εύκολα ότι η απώλεια φθοράς σχετίζεται με το πάχος του «λευκού στρώματος». Είναι εμφανές ότι το «λευκό στρώμα» μειώνει την αντίσταση στην φθορά του υλικού. Όσο πιο παχύ είναι το λευκό στρώμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια φθοράς. Έτσι η σοβαρή φθορά που παρουσίασε το δοκίμιο με το «λευκό στρώμα» οφείλεται ακριβώς σε αυτό.

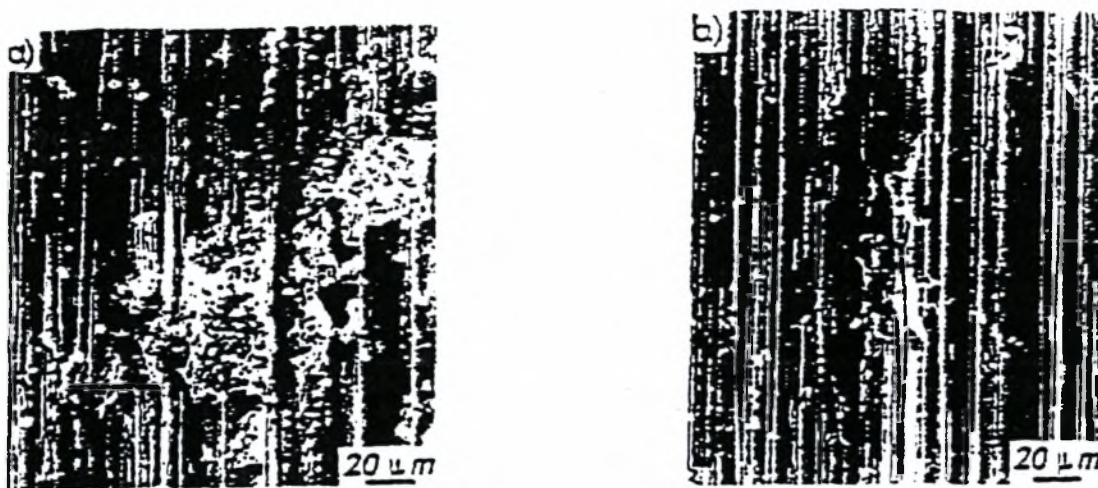


**Σχ. IV.1.7.** Πάχος του «λευκού στρώματος»  
Σε σχέση με την σκληρότητα του  
Βασικού μετάλλου



**Σχ. IV.1.8.** Απώλεια φθοράς σε σχέση με την  
σκληρότητα του βασικού μετάλλου

Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πειράματα μηχανικής κατεργασίας της επιφάνειάς τους και έπειτα εξετάστηκαν με μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM). Οι φωτογραφίες σχ. IV.1.9.a, b δείχνουν τις φθαρμένες επιφάνειες του δοκιμίου που είχε το «λευκό στρώμα» (a) και του δοκιμίου που δεν είχε «λευκό στρώμα» (b). Η φωτογραφία (a) δείχνει ότι τα βαθιά κοιλώματα απολεπίσης (delamination pits) παραμένουν ακόμα στην φθαρμένη επιφάνεια καίτοι αυτή εφθάρη περαιτέρω από τον μηχανισμό κοπής. Αντιθέτως η φωτογραφία (b) – δοκίμιο χωρίς το «λευκό στρώμα» – δείχνει ομοιογενή φθορά από τα σωματίδια απόξεσης δηλαδή υπάρχουν μόνο τα ομογενή αυλάκια κοπής.



(a)

(b)

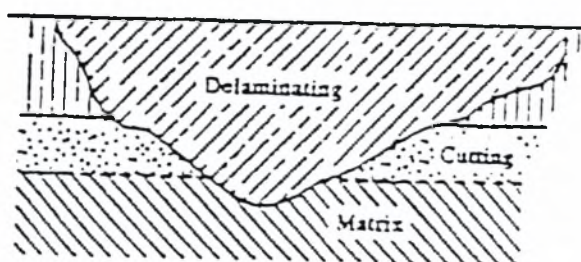
Σχ. IV.1.9. Φωτογραφίες SEM φθαρμένων επιφανειών δοκιμίων

(a) δοκιμίου με λευκό στρώμα

(b) δοκιμίου χωρίς λευκό στρώμα

Έτσι αποκαλύπτεται μια βασική διαφορά στην φύση της φθοράς στις δύο περιπτώσεις. Όπου υπάρχει εξωτερικό «λευκό στρώμα», η φθορά οφείλεται κυρίως στην απολέπιση υλικού υπό την μορφή φολιδών (delamination flakes), ενώ στα δοκίμια χωρίς «λευκό στρώμα» η φθορά δημιουργείται από τα ρινίσματα μικροκοπής. Οι φολίδες απολέπισης έχουν ανώμαλο σχήμα, συνήθως  $\sim 100\mu\text{m}$  μήκους και  $\sim 30\mu\text{m}$  πάχους, ενώ τα ρινίσματα μικροκοπής έχουν πάχος  $< \sim 10\mu\text{m}$ . Είναι προφανές ότι οι μεγάλες φολίδες απολέπισης αυξάνουν τα απώλειες φθοράς [14].

Τελικά στα δοκίμια που έχουν επιφανειακό «λευκό στρώμα», δύο μηχανισμοί φθοράς είναι υπεύθυνοι για την φθορά τους. Κατά πρώτον το υλικό απολεπίζεται από το «λευκό στρώμα» της επιφάνειάς του. Στην συνέχεια το υλικό από κάτω κόβεται μηχανικά. Δηλαδή η απολέπιση του «λευκού στρώματος» επέρχεται πριν την κατεργασία κοπής. Αυτός ο μηχανισμός φθοράς δίνεται σχηματικά στο σχ. IV.1.10 που ακολουθεί [14].



Σχ. IV.1.10 Τεχνοτροπία του μηχανισμού φθοράς.

Έχουμε αναφέρει και άλλου σ' αυτή την εργασία ότι το «λευκό στρώμα» προκαλεί επιφανειακή σκλήρυνση των μετάλλων, αλλά από τα αποτελέσματα που εκθέσαμε εδώ είναι δύσκολο να συμπεράνει κανείς ότι αυτό βελτιώνει την αντίσταση στην φθορά. Αντίθετα μάλιστα, η αντίσταση στην φθορά ελαττώνεται από το «λευκό στρώμα» στα δοκίμια. Και αυτό ίσως να οφείλεται στην εμφάνιση των μικρορωγμών, κύριο χαρακτηριστικό του λευκού στρώματος. Μάλιστα αυτές οι μικρορωγμές μπορούν να διαδοθούν και στην διεπιφάνεια μεταξύ «λευκού στρώματος» και του ανεπηρέαστου βασικού μετάλλου. Αυτή η διάδοση των μικρορωγμών προκαλεί την απολέπιση του «λευκού στρώματος».

Πριν όμως προχωρήσουμε στην παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων τριβής και φθοράς θα θέλαμε να δώσουμε κάποιους ποσοτικούς νόμους της φθοράς πρόσφυσης. Από μεγάλο πλήθος πειραματικών δεδομένων λοιπόν, προκύπτουν κάποιοι ποσοτικοί συσχετισμοί για την φθορά πρόσφυσης που συνήθως αναφέρονται σαν **νόμοι της φθοράς πρόσφυσης** και είναι:

1. Η φθορά είναι ευθέως ανάλογη του φορτίου
2. Η φθορά είναι γενικά ανάλογη της διανυθείσας απόστασης ολίσθησης
3. Η φθορά είναι γενικά αντιστρόφως ανάλογη της σκληρότητας της φθειρόμενης επιφάνειας.

Έτσι ο Holm προτείνει την σχέση

$$V = c \frac{N l}{H} \quad (\text{εξ. IV.1.1}), \text{ όπου}$$

$c$  = η αδιάστατη σταθερά που εξαρτάται από τα υλικά του τριβοσυστήματος και την καθαρότητα των επιφανειών

$N$  = το φορτίο

$l$  = η διανυθείσα απόσταση

$H$  = η σκληρότητα του υλικού

$V$  = ο όγκος φθοράς [12]

Ο Archard από την άλλη πρότεινε την επόμενη εξίσωση για την φθορά που έχει και το όνομά του:

$$V = \frac{k L S}{3H} \quad (\text{εξ. IV.1.2}), \text{ όπου}$$

$V$  = ο όγκος φθοράς

$k$  = ο συντελεστής φθοράς

$L$  = το εφαρμοζόμενο κάθετο φορτίο

$S$  = η απόσταση ολίσθησης

$H$  = η σκληρότητα του μαλακότερου από τα δύο υλικά σε επαφή [13].

Ο συντελεστής φθοράς  $k$  παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με τα υλικά σε επαφή, μερικές τιμές του δίνονται στον πίνακα IV.1.10 που ακολουθεί [12].

**ΠΙΝΑΚΑΣ IV.1.10** Συντελεστής φθοράς  $k$  για διάφορα υλικά

Τριβосύστημα	$k$ [-]
Zn επί Zn	$160 \times 10^{-3}$
Χάλυβας επί χάλυβα	45
Cu επί Cu	32
Ανοξ. χάλυβας επί ανοξ. χάλυβα	21
Cu επί χάλυβα	1.5
Χάλυβας επί Cu	0.5
Βακελίτης επί βακελίτη	0.02

Αν τόσο στην εξίσωση IV.1.1 όσο και στην IV.1.2 όλες οι άλλες παράμετροι παραμείνουν σταθερές, προκύπτει ότι υλικά με υψηλότερη σκληρότητα δίνουν λιγότερη φθορά. Αυτό όμως όπως είδαμε στα παραδείγματα των προηγούμενων σελίδων δεν ισχύει πάντα, ήτοι **υλικά με υψηλότερη σκληρότητα δεν δίνουν αναγκαστικά και λιγότερη φθορά σε σχέση με εκείνα χαμηλότερης σκληρότητας.**

#### **IV.2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΒΗΣ**

Το επόμενο βήμα λοιπόν όσον αφορά την ποιότητα επιφανείας που παράγει η μέθοδος EDM, ήταν το να εξετασθεί η τριβολογική συμπεριφορά των επιφανειών αυτών. Αυτό έγινε με πειραματική έρευνα στα γνωστά EDM δοκίμια του CK60 χάλυβα, όπου ελέγχθηκε η επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων της ηλεκτροδιάβρωσης (του ρεύματος  $I$  και της διάρκειας  $T$  του παλμού) πάνω στην τριβολογική απόδοση των επιφανειών των δοκιμών. Προς τούτο πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών τριβής και φθοράς.

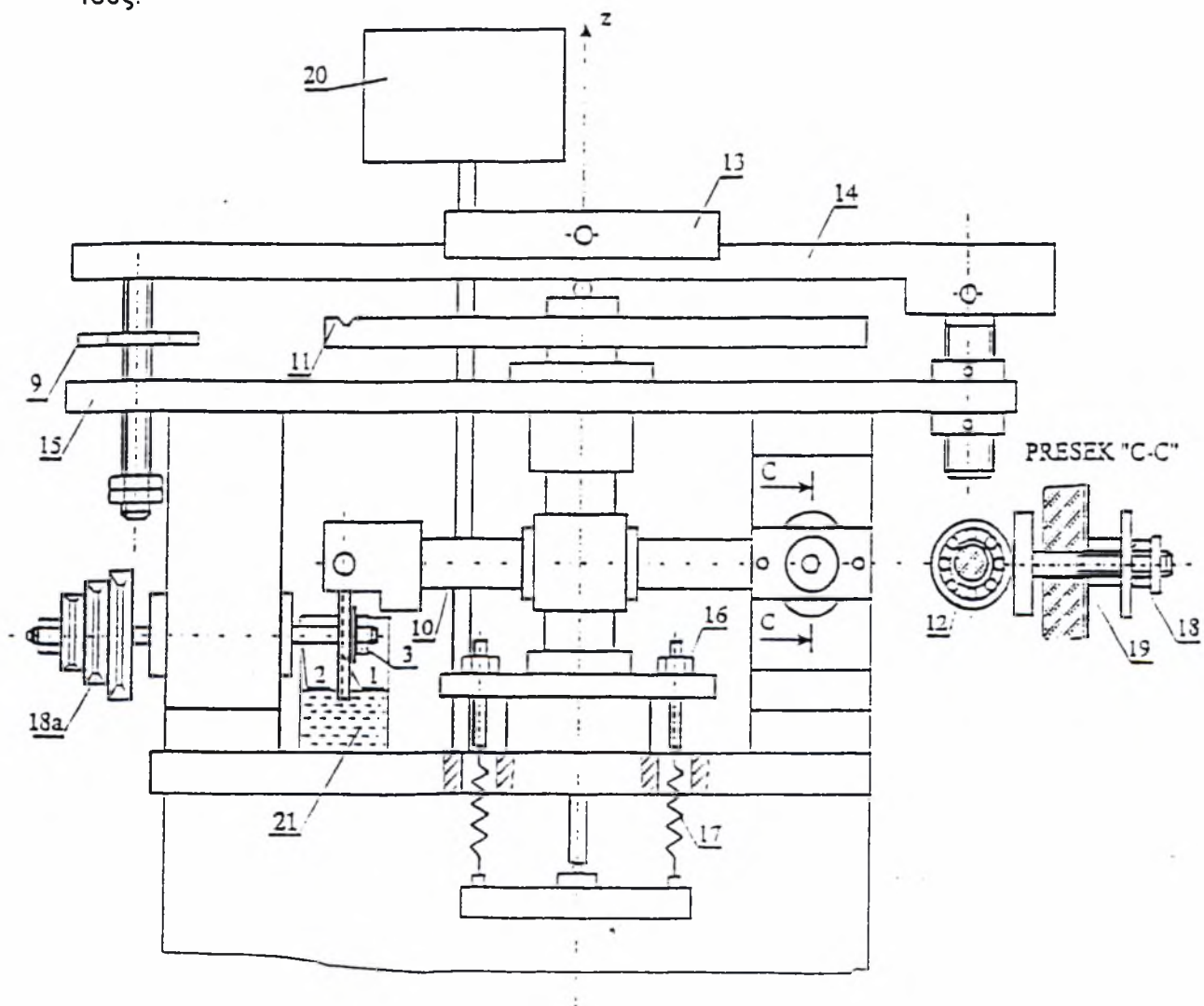
Τα πειράματα τριβής έγιναν με ένα τριβόμετρο δίσκου (pin – on – disk tribometer) το μοντέλο TPD – 95C της PRIZMA KRAGUJEVAC με παραμέτρους λειτουργίας τις κάτωθι:



- **κάθετο φορτίο  $W$ :** 25N, 50N, 100N (αναλόγως με το πείραμα)
- **δίσκος περιστροφής (counterpart):** ένας δίσκος από ανοπτημένο και σκληρυμένο δια βαφής χάλυβα εργαλείων D6 με σκληρότητα 60 HRC και τραχύτητα επιφάνειας  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ .
- **Ταχύτητα περιστροφής:** περίπου 0,5 m/sec ή ισοδυνάμως (από την σχέση  $u = 2\pi n.r$ ) συχνότητα περιστροφής  $n = 2.6 \text{ Hz}$ , σταθερές.
- **Διάμετρος δίσκου:**  $2r = 60 \text{ mm}$
- **Συνθήκες πειράματος:** Το πείραμα έγινε με ξηρά τριβή, ενώ η επαφή δοκιμίου – δίσκου ήταν κατά μήκος γραμμής.

**Δοκίμια:** Χρησιμοποιήθηκαν τμήματα (coupons) από τα αρχικά 12 ηλεκτροδιαβρωμένα δοκίμια.

Στα σχ. IV.2.1a,b δίνουμε τα σκίτσα του τριβόμετρου που χρησιμοποιήθηκε και του υποδοχέα του δοκιμίου καθώς και μια ονοματολογία των κυριότερων μερών τους.



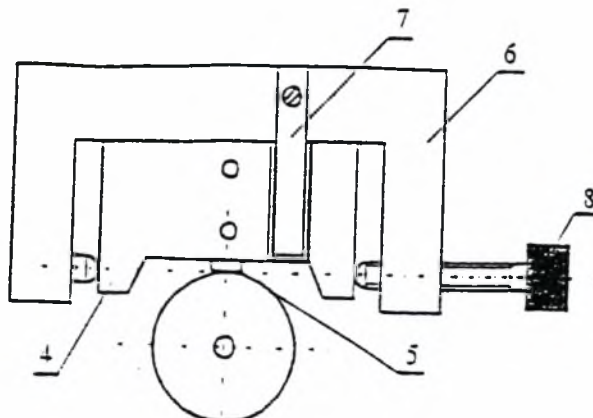
Σχ. IV.2.1.a Το σχέδιο του τριβόμετρου TPD – 95C



Σχ. IV.2.1.a Το σχέδιο του τριβόμετρου TPD – 95C

### Ονοματολογία

1. Δίσκος περιστροφής
2. Άξονας περιστροφής
13. Κινούμενο βάρος
20. Πίνακας ελέγχου
21. Δεξαμενή λιπαντικού
5. Δοκίμιο
4. Υποδοχέας δοκιμίου
6. Κύριος υποδοχέας
7. Έλασμα κεντραρίσματος
8. Κοχλίας σύσφιξης



Σχ. IV.2.1.b Ο υποδοχέας του δοκιμίου

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων εμετρήθη ο συντελεστής τριβής ολισθήσεως  $\mu$  σε συνάρτηση με την διανυόμενη απόσταση τριβής  $S$  ή ισοδυνάμως με τον χρόνο  $t$  που προήλθε ( $S = u t$ ,  $u = 0,5 \text{ m/sec}$ ). Χρησιμοποιήσαμε για τους σκοπούς του πειράματος δύο δοκίμια

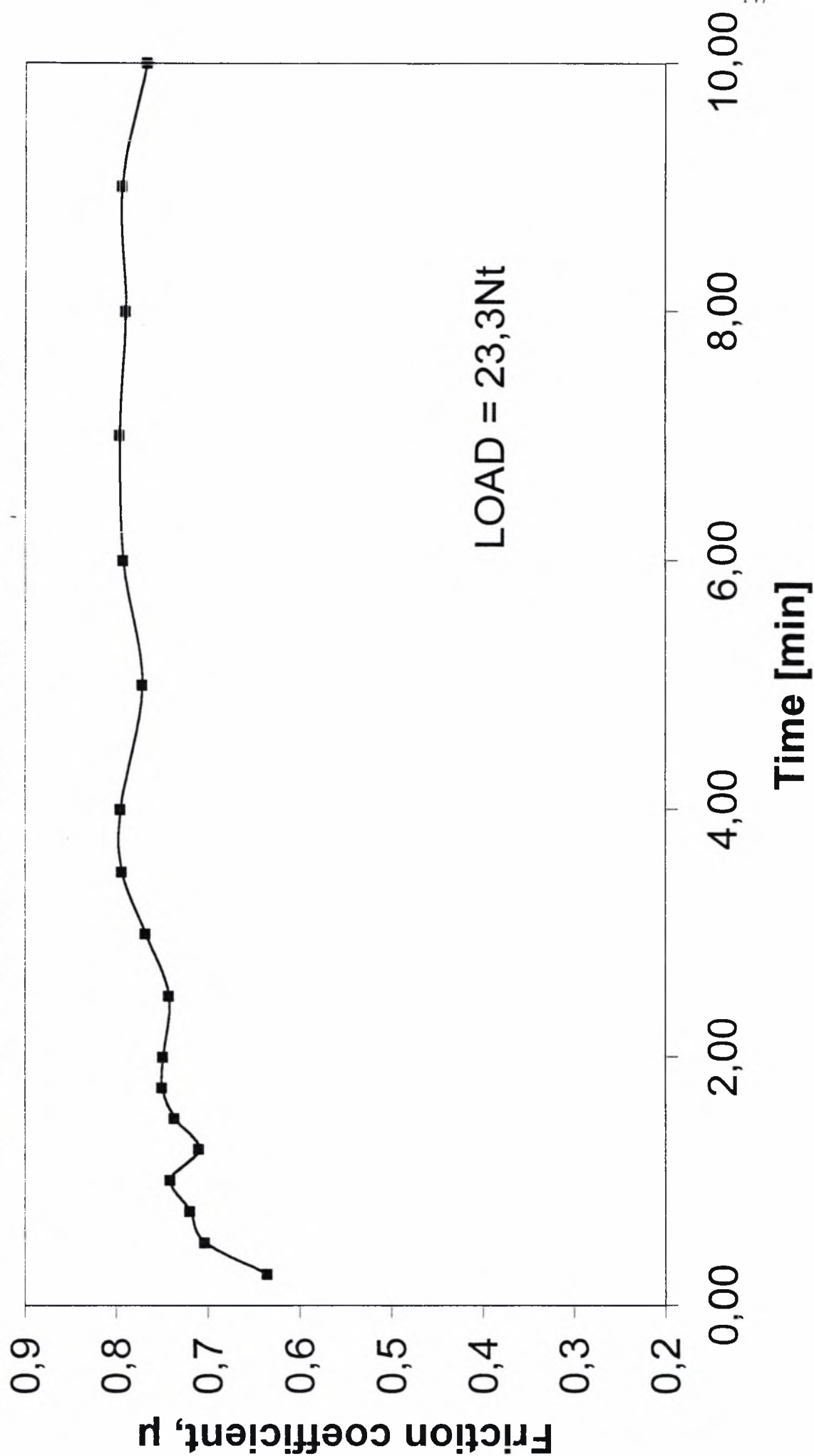
α) αυτό με παραμέτρους EDM κατεργασίας τις:  $I = 5A$ ,  $T = 100 \mu\text{sec}$

β) αυτό με παραμέτρους EDM κατεργασίας τις:  $I = 10A$ ,  $T = 100 \mu\text{sec}$

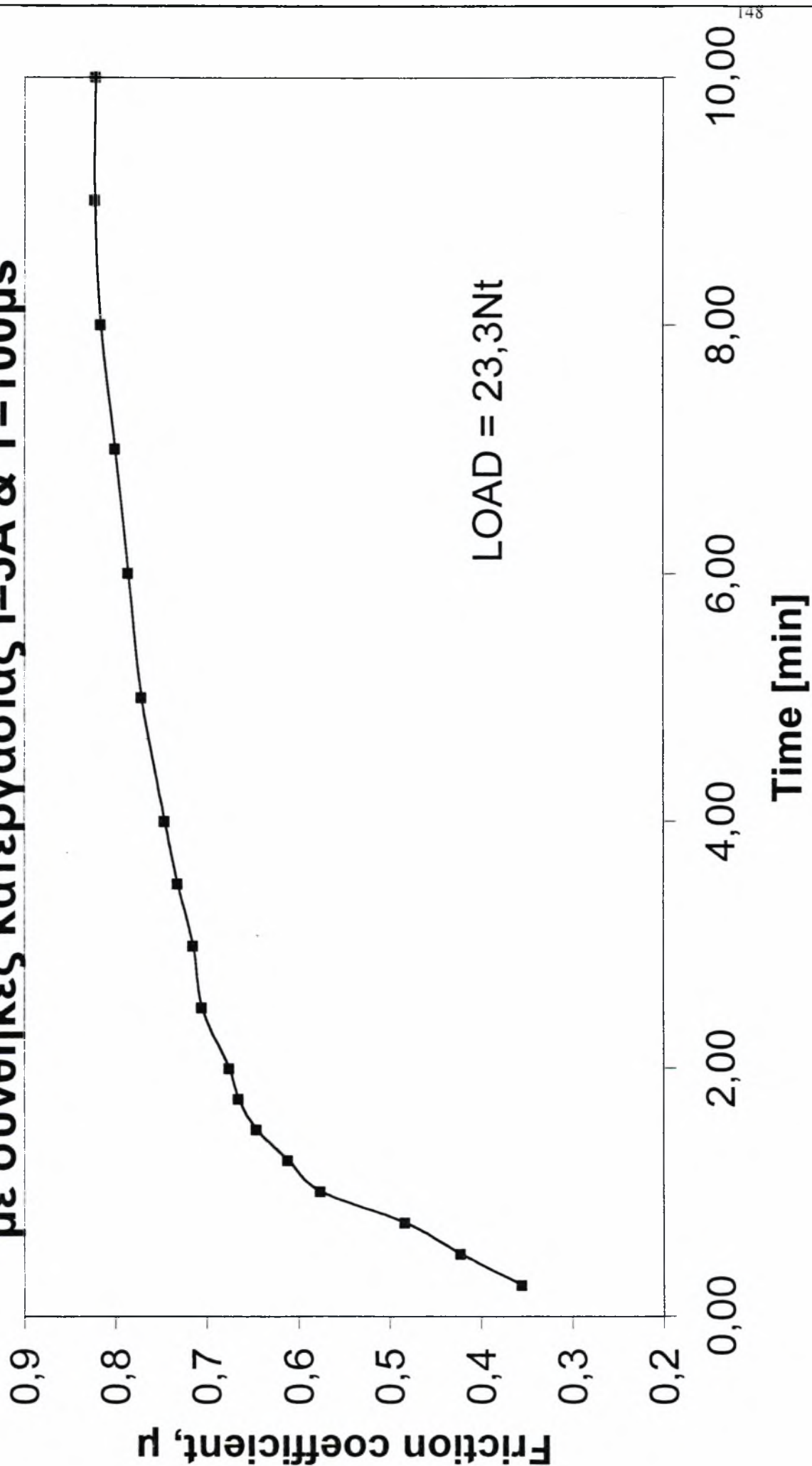
Στη συνέχεια δίνουμε τον πίνακα  $F_0$  με τις αναλυτικές τιμές του συντελεστού τριβής  $\mu$  συναρτήσει του χρόνου  $t$  καθώς και τα σχετικά διαγράμματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις αυτές.



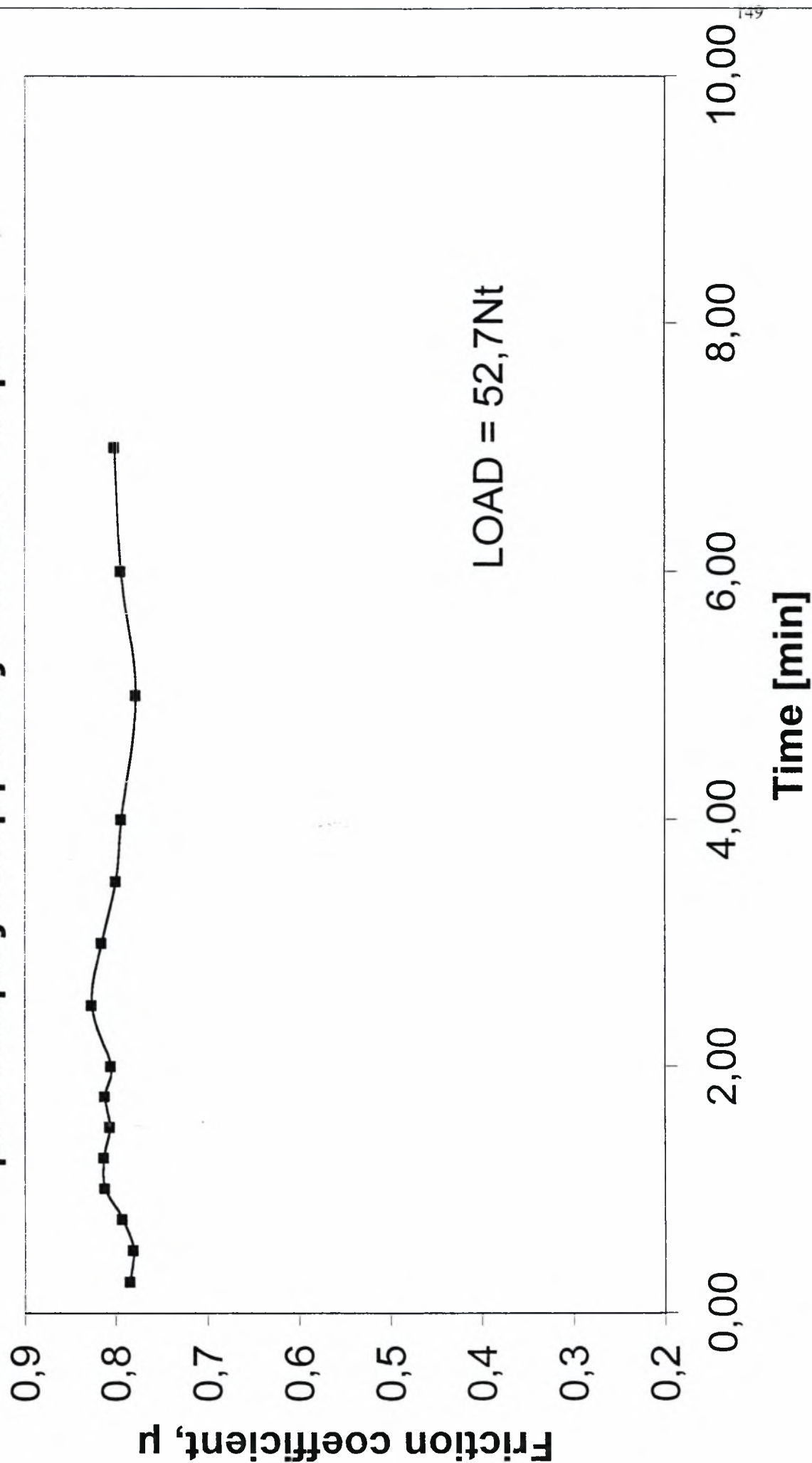
Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων  
με συνθήκες κατεργασίας  $I=5A$  &  $T=100\mu s$



# Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων με συνθήκες κατεργασίας I=5A & T=100μs

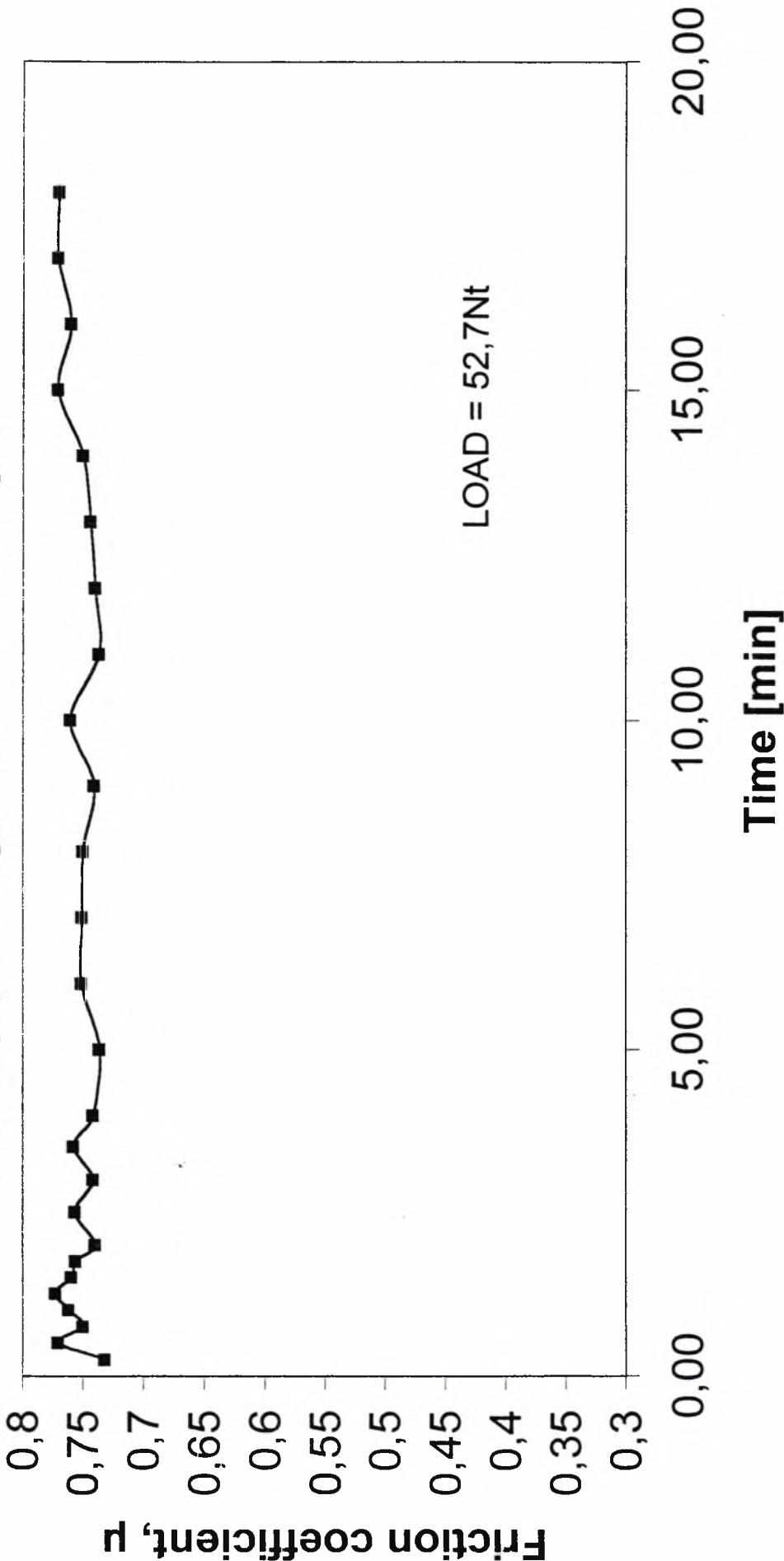


Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων  
με συνθήκες κατεργασίας  $I=5A$  &  $T=100\mu s$

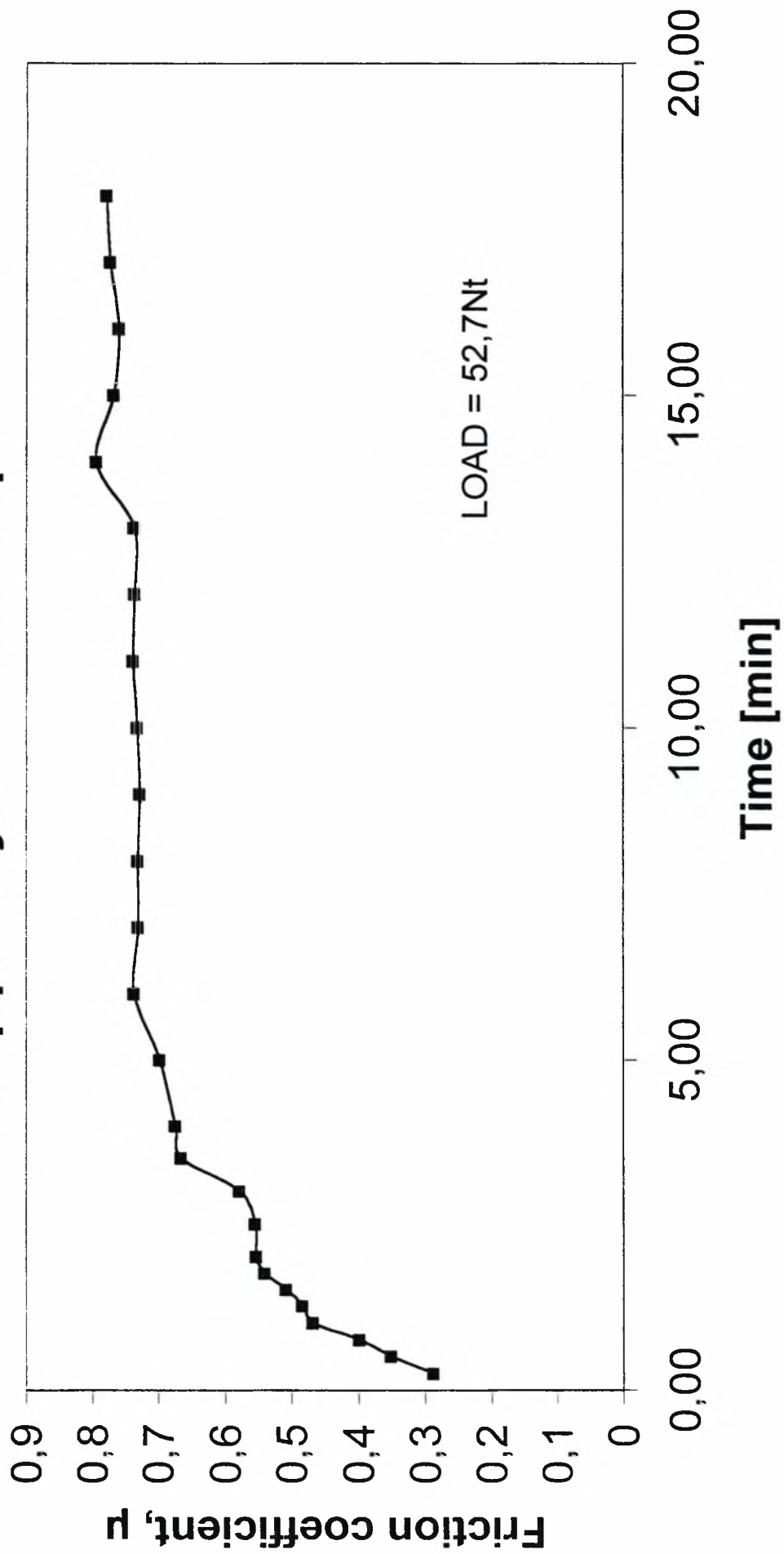




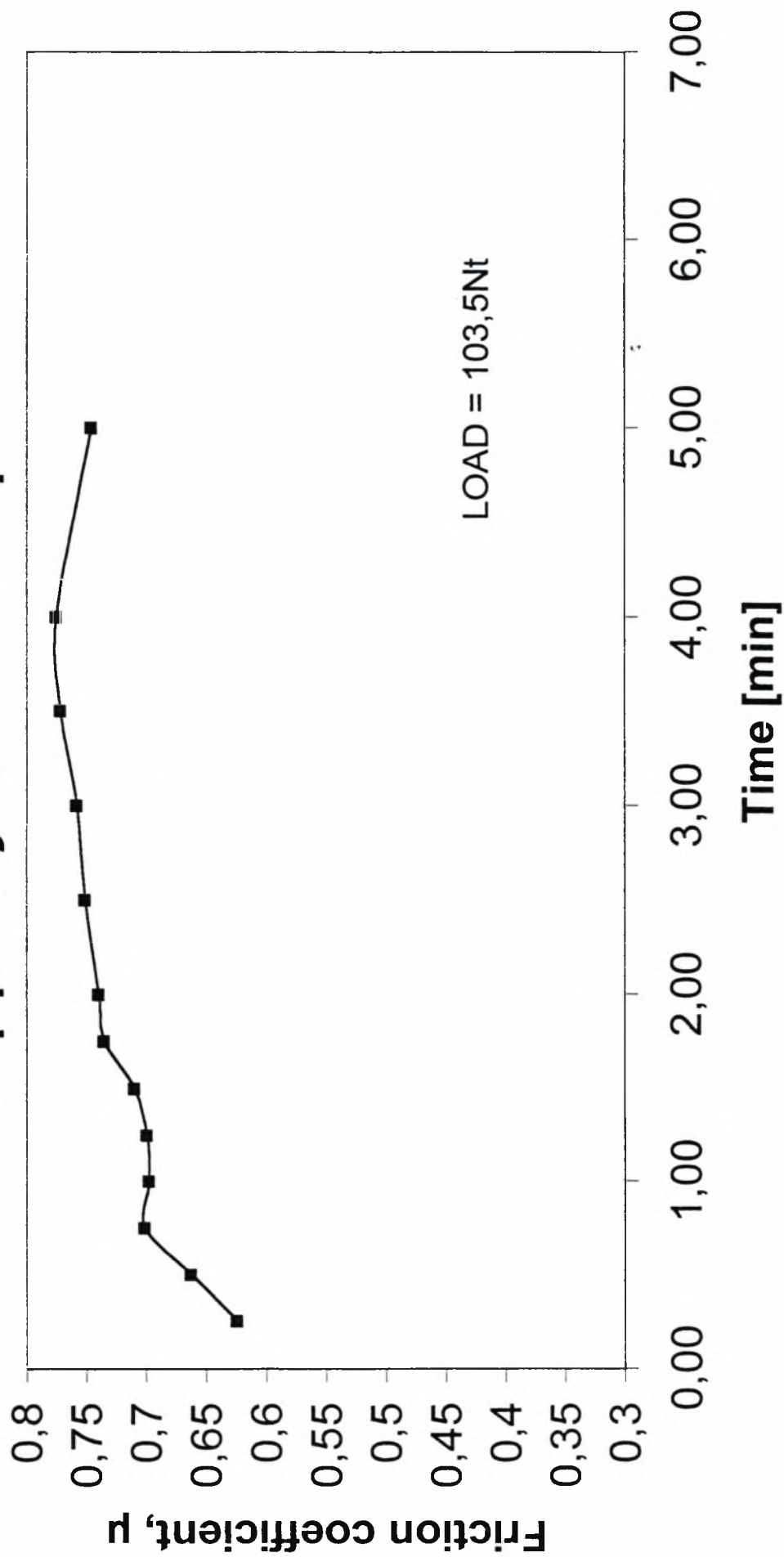
# Συντελεστής τριβής EDM δοκιμών με συνθήκες κατεργασίας I=5A & T=100μs



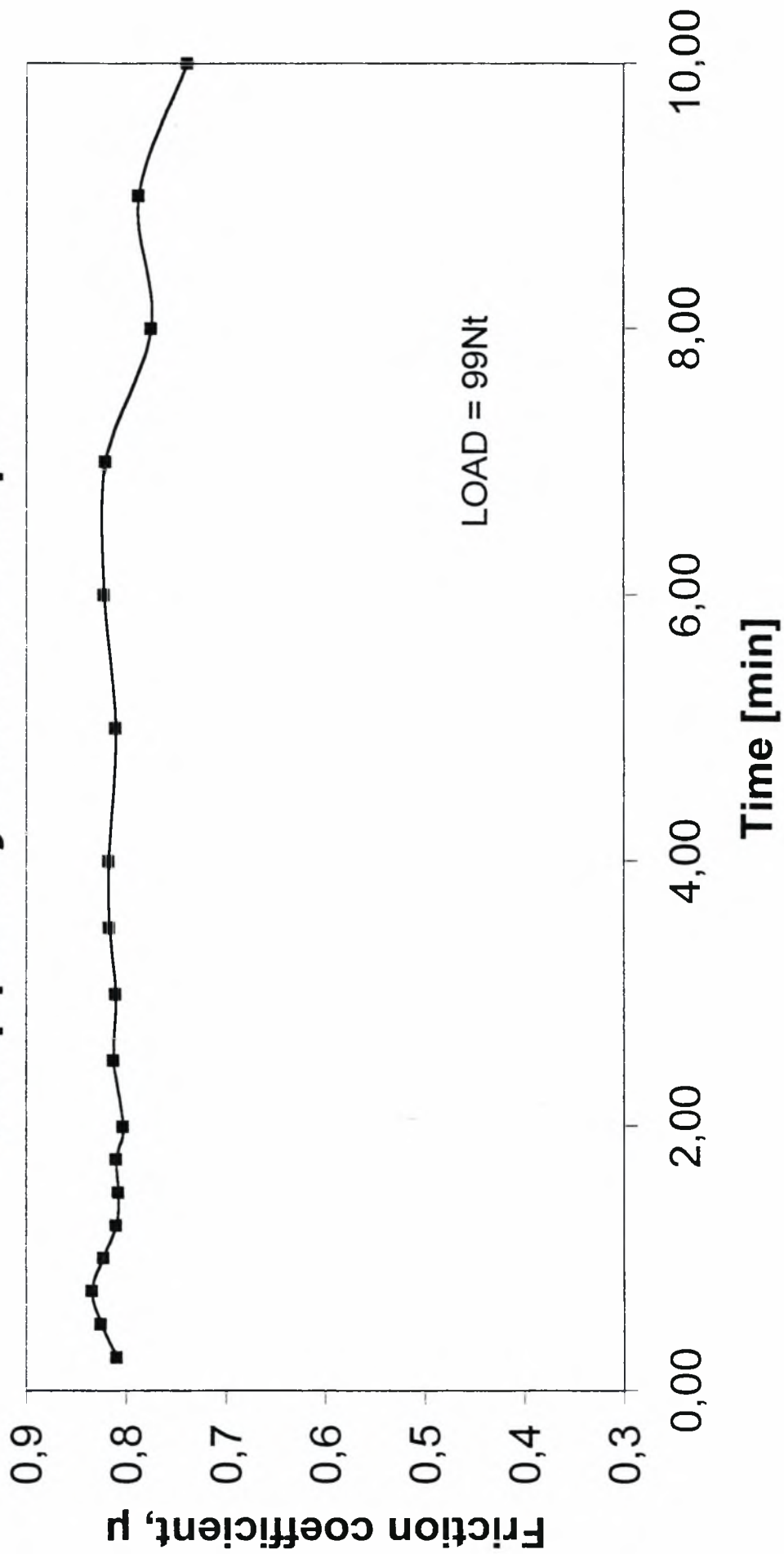
## Συντελεστής τριβής EDM δοκιμών με συνθήκες κατεργασίας $I=5A$ & $T=100\mu s$

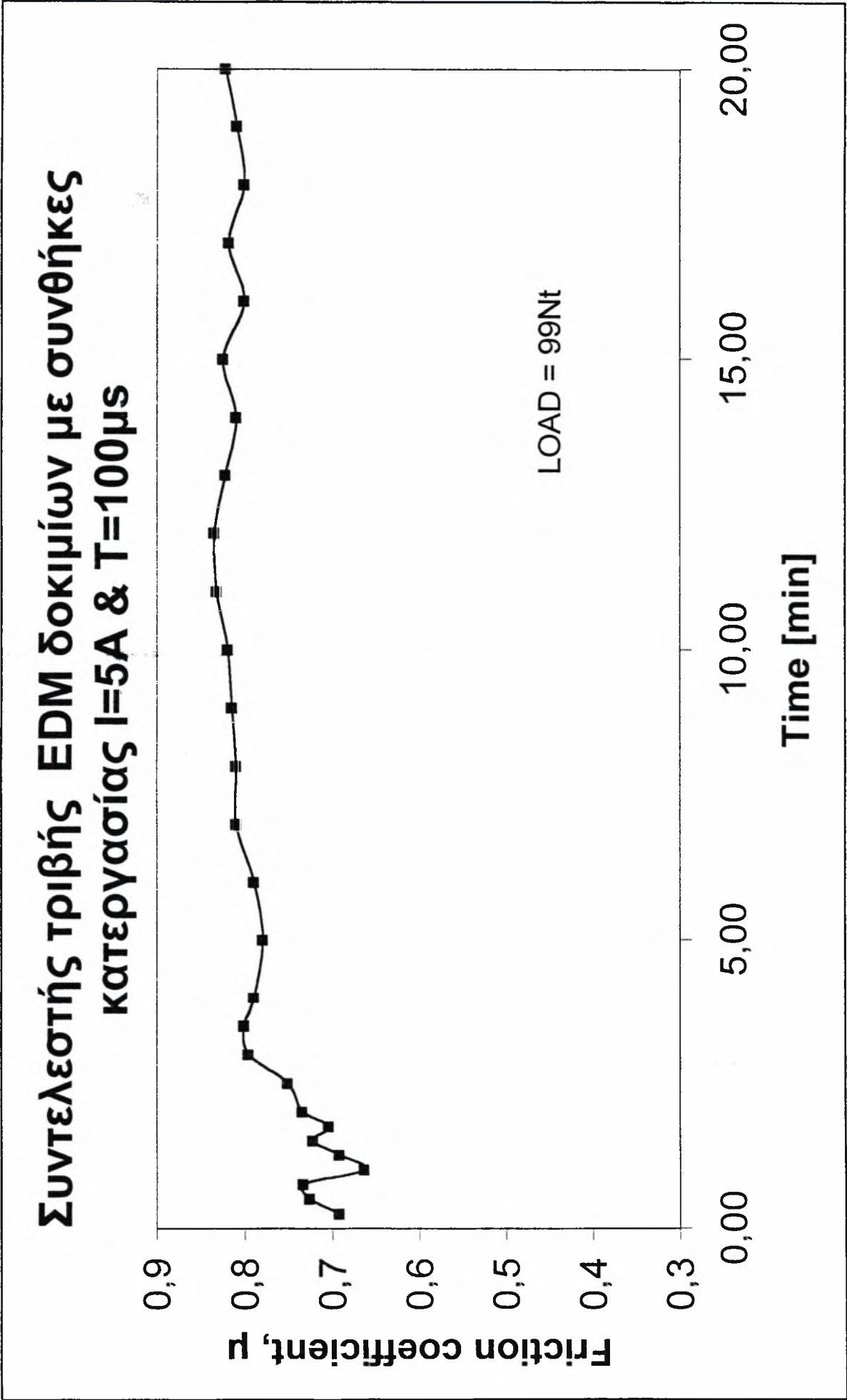


# Συντελεστής τριβής EDM δοκιμών με συνθήκες κατεργασίας I=5A & T=100μs



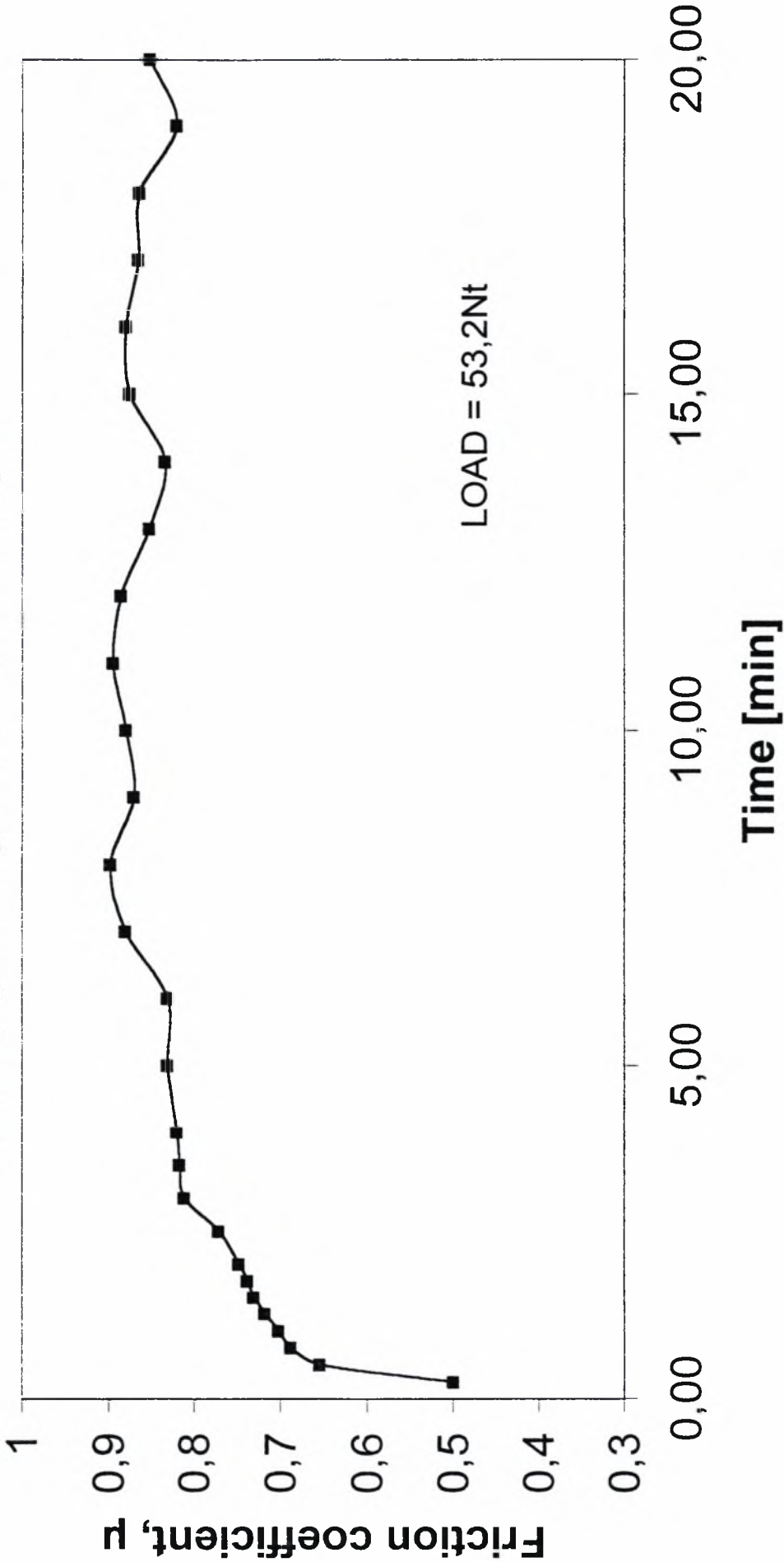
# Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων με συνθήκες κατεργασίας I=5A & T=100μs



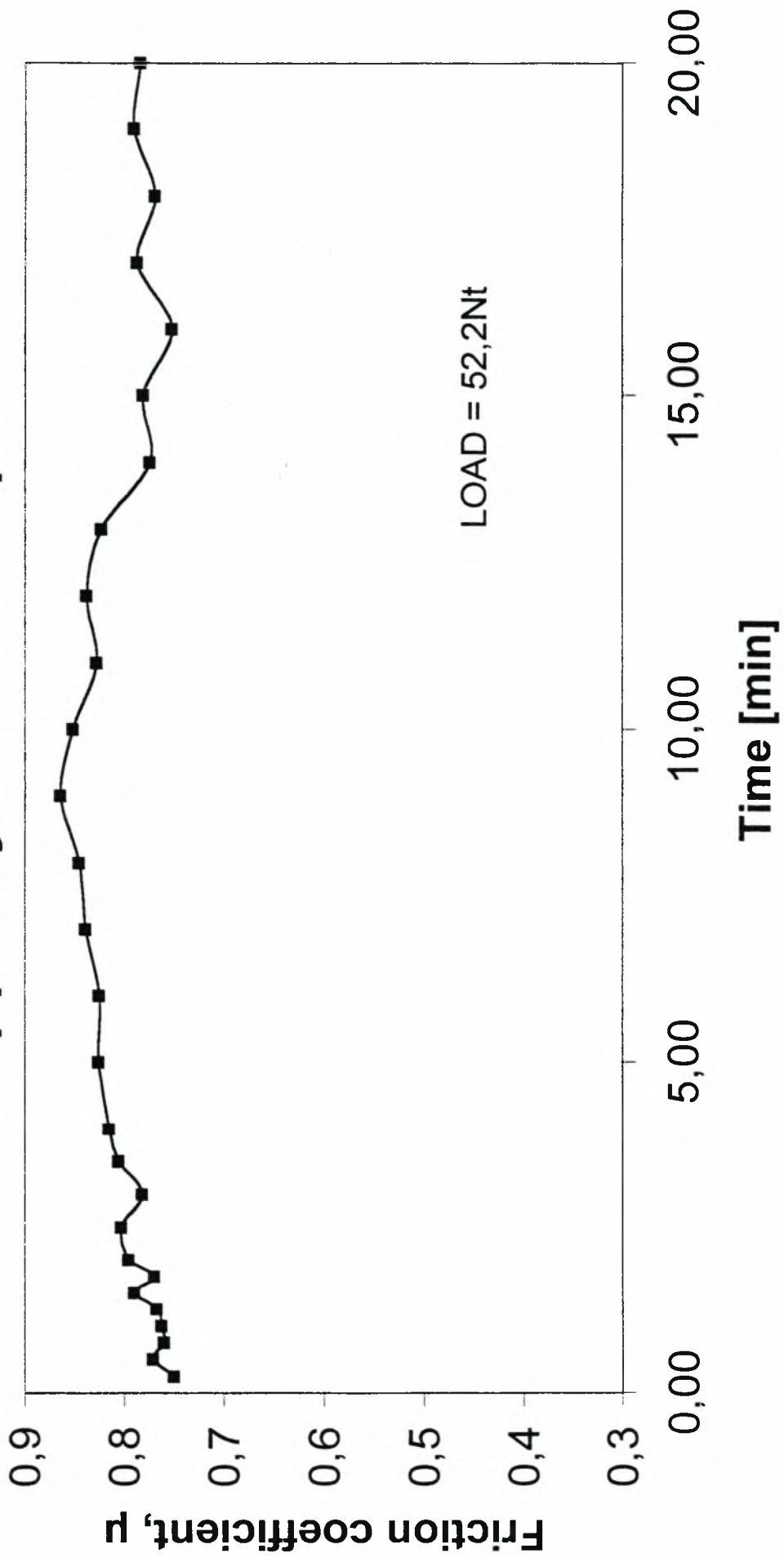




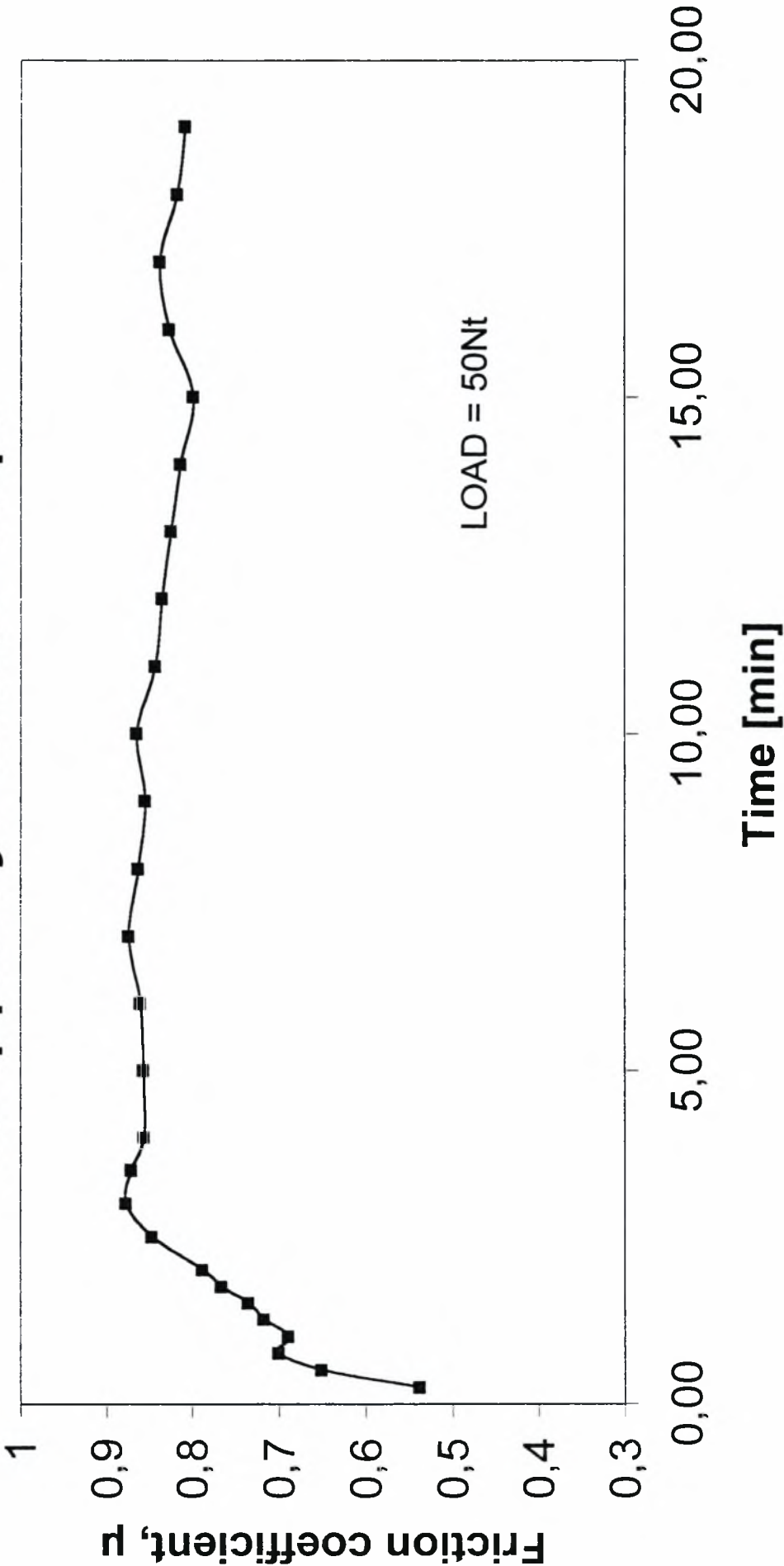
Συντελεστής τριβής EDM δοκιμών με συνθήκες  
κατεργασίας I=5A & T=100μs



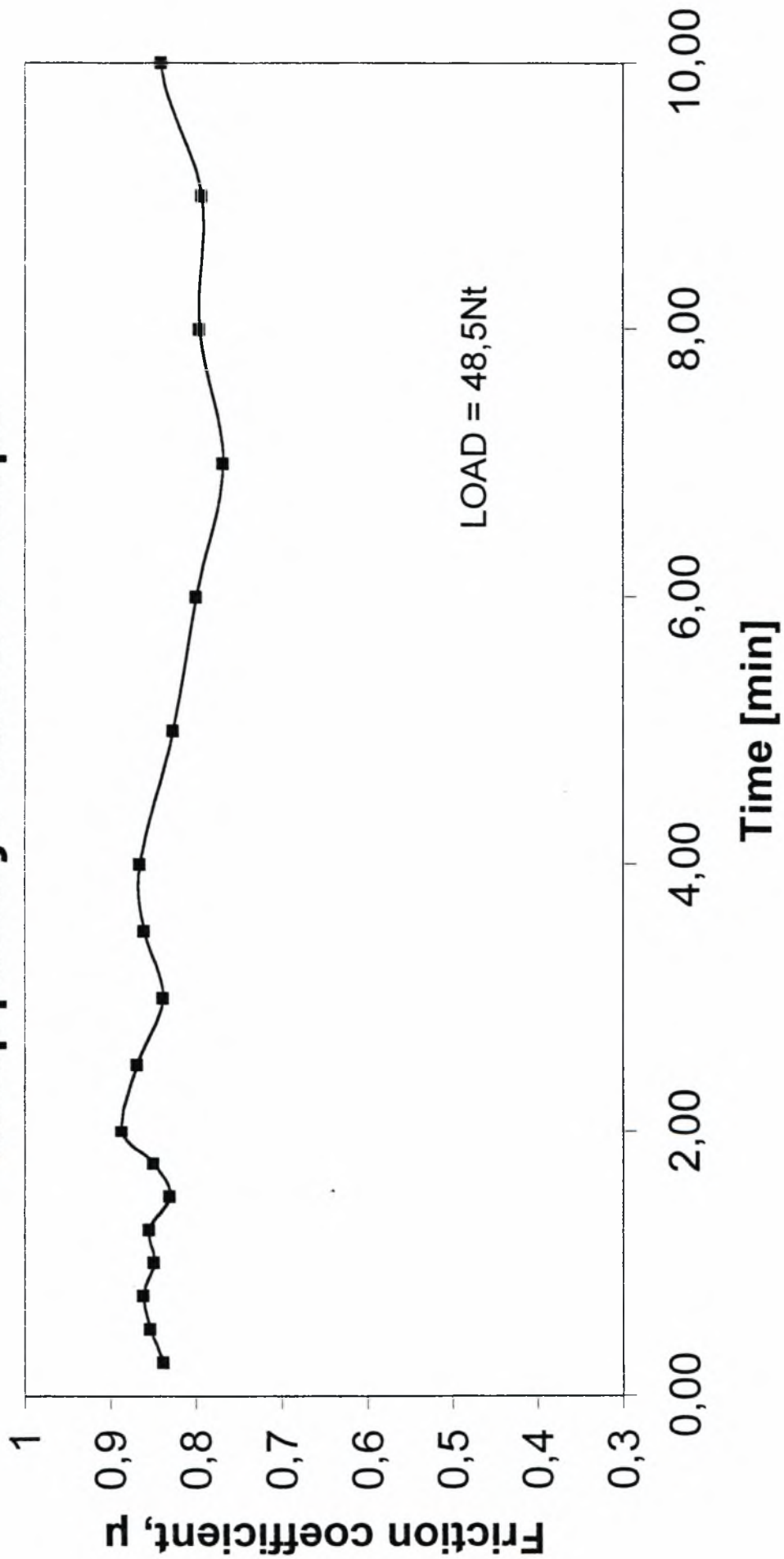
## Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων με συνθήκες κατεργασίας $I=5A$ & $T=100\mu s$



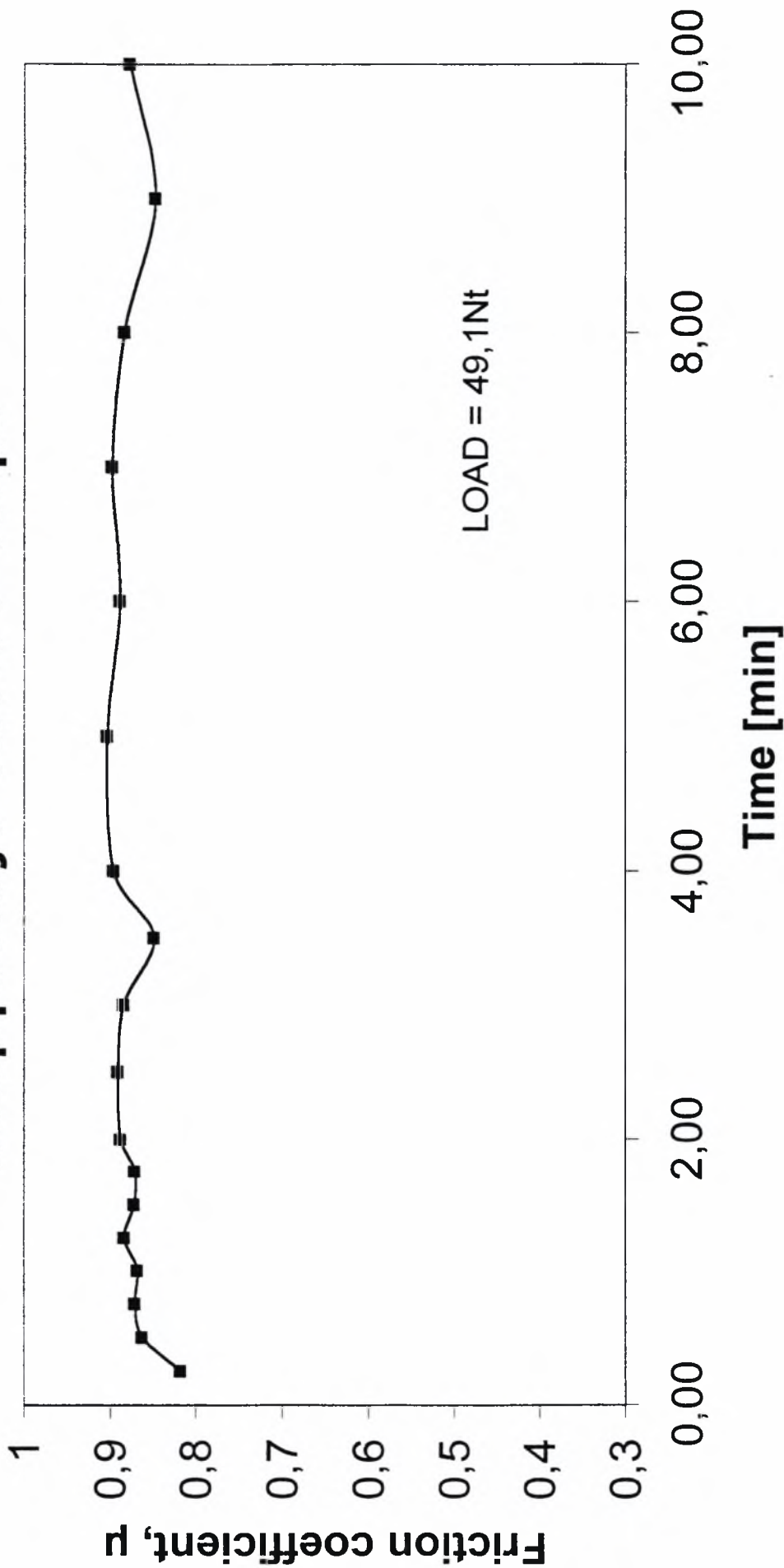
**Συντελεστής τριβής EDM δοκιμών με συνθήκες  
κατεργασίας I=10A & T=100μs**



## Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων με συνθήκες κατεργασίας I=10A & T=100μs

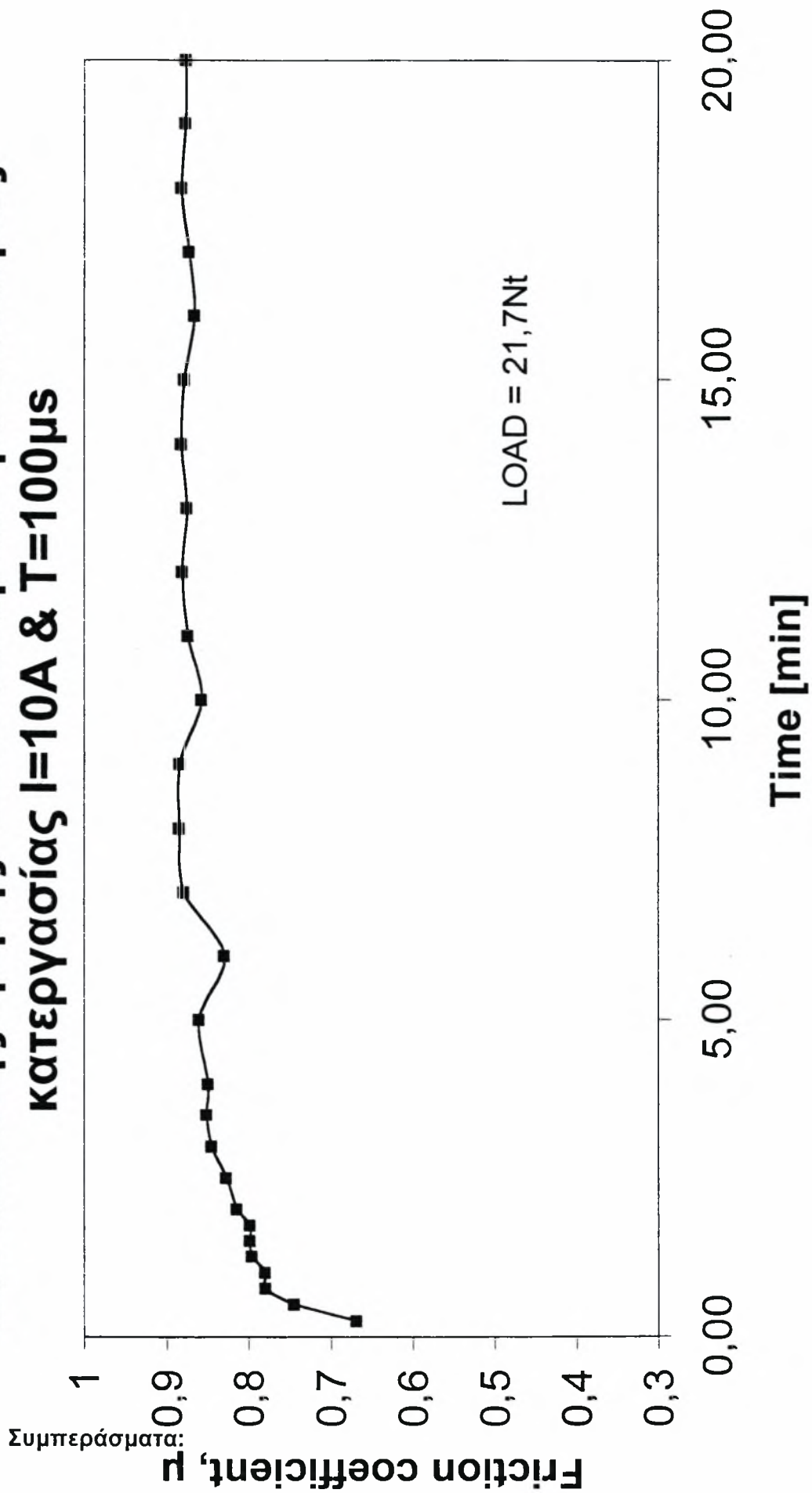


Συντελεστής τριβής EDM δοκιμών με συνθήκες  
κατεργασίας I=10A & T=100μs





## Συντελεστής τριβής EDM δοκιμίων με συνθήκες κατεργασίας $I=10A$ & $T=100\mu s$



### Συμπεράσματα:

Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα διαγράμματα αυτά, μπορούν να εντοπισθούν στα κάτωθι:

1. Ο συντελεστής (ξηράς) τριβής ολισθήσεως  $\mu$ , ξεκινάει στις πιο πολλές περιπτώσεις από χαμηλές τιμές αλλά μετά αυξάνει σημαντικά και σχετικά γρήγορα. Αυτό το μεταβατικό στάδιο εντοπίζεται στην αρχή των δοκιμών και μπορεί να αποδοθεί στην ταχύτατη απομάκρυνση του «λευκού στρώματος», το οποίο όπως έχουμε πει, αποτελεί σε όλες τις περιπτώσεις το εξώτατο στρώμα (την επιδερμίδα) όλων των επιφανειών που είναι κατεργασμένες με ηλεκτροδιάβρωση. Μάλιστα στις πιο πολλές περιπτώσεις, εκεί όπου έχουμε την μεγαλύτερη ενέργεια παλμού (ή γινόμενο  $I \times T$ ) έχουμε και την πιο γρήγορη αύξηση του συντελεστού τριβής  $\mu$ . Αυτό μπορεί να καταλογισθεί στην αντίστοιχα γρηγορότερη φθορά του «λευκού στρώματος» καθόσον όπως έχουμε δει, το πάχος του «λευκού στρώματος» και το μέσο μέγιστο μήκος ρωγμών – τα οποία συμβάλλουν στην γρήγορη εξουδετέρωσή του – αυξάνουν κατά τον κανόνα  $b_0(I \times T)^{b_1}$  με το γινόμενο  $I \times T$  ( $b_0 > 0$ ,  $0 < b_1 < 1$ ). Να σημειώσουμε εδώ ότι στα πειράματα αυτά τριβής EDM δοκιμών, πρώτα απ' όλα φθείρεται εντελώς το «λευκό στρώμα». Στην συνέχεια και ενώ συνεχίζεται το πείραμα, η φθορά προχωράει στο υποκάτω στρώμα που είναι η θερμικά επηρεασμένη ζώνη όπου και ο συντελεστής τριβής σταθεροποιείται ή τείνει να σταθεροποιηθεί σε κάποια τιμή που τελικά αντιπροσωπεύει και τα υλικά. Όσον τώρα αφορά την φθορά του «λευκού στρώματος», αυτή οφείλεται σε έναν μηχανισμό διάβρωσης και θρυμματισμού λόγω των υπαρχουσών ρωγμών εκεί, ενώ η φθορά της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης οφείλεται σε μηχανική διάβρωση. Τέλος η γρήγορη αύξηση του  $\mu$  σε EDM επιφάνειες με μεγάλη ενέργεια παλμού, εξηγείται και από το ότι η μεγάλη ενέργεια παλμού δίνει μεγάλου βάθους και διαμέτρου κρατήρες, ήτοι επιφάνεια με οξύτητα προεξοχών και μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (δες και πολυπαραμετρική ανάλυση, συμπεράσματα σελ. 137), οι οποίες «τρώγονται» γρήγορα.
2. Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με EDM κατεργασία με  $I = 10 \text{ A}$  και  $T = 100 \mu\text{s}$  δίνουν ελαφρά υψηλότερη τιμή του συντελεστή τριβής (κοντά στο 0,9) εν σχέση, με τα δοκίμια με παραμέτρους EDM κατεργασίας  $I = 5 \text{ A}$  και  $T = 100 \mu\text{s}$ . (δες τους πίνακες I5T100 και I10T100 του excel με τους μέσους όρους των

μετρήσεων). Αυτή η μικρή άνοδος του συντελεστού τριβής αποδίδεται στην αυξημένη τραχύτητα που παρουσιάζουν τα πρώτα δοκίμια, σύμφωνα με την μοριο – μηχανική θεωρία αλλά και στην αυξημένη τιμή της  $R_p$  (μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή).

3. Η συμπεριφορά του «λευκού στρώματος» όπως την αναλύσαμε στην παρατήρηση 1, δείχνει ότι από τριβολογική άποψη, οι ηλεκτροδιαβρωμένες επιφάνειες μπορούν να θεωρηθούν σαν «επικαλυμμένες» επιφάνειες.
4. Η πολύ ψηλές τραχύτητες (με τιμές εκτός του συνηθισμένου εύρους τραχύτητας τεχνολογικών επιφανειών) των EDM δοκιμίων, είχαν σαν αποτέλεσμα και τις υψηλές τιμές των συντελεστών τριβής  $\mu$  που μετρήθηκαν στα πειράματα.
5. Ο συντελεστής τριβής δεν εξαρτάται από το κάθετο φορτίο  $W$ .

### **IV.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΘΟΡΑΣ**

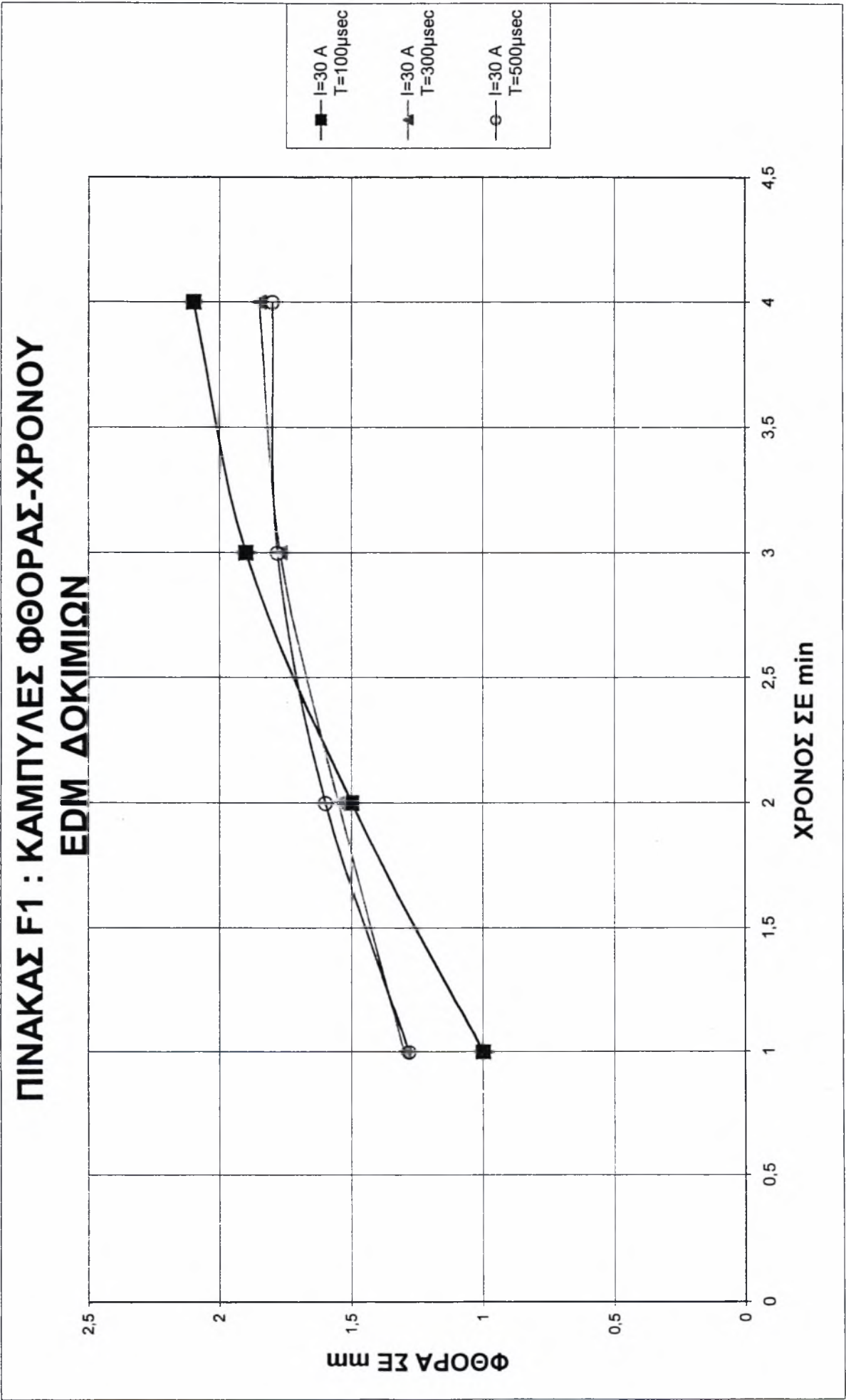
Στην συνέχεια προχωρούμε στην μέτρηση της φθοράς. Προς τούτο τοποθετούμε δοκίμια από EDM επιφάνειες στο ίδιο τριβόμετρο δίσκου όπως πριν και ίδιες συνθήκες (φορτίο  $W = 50\text{Nt}$ , συχνότητα  $f = 2,6\text{ Hz}$ ) και μετράμε κάθε φορά το μέσο εύρος του αυλακιού που δημιουργεί ο δίσκος περιστροφής του τριβόμετρου στο δοκίμιο σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η μέτρηση του εύρους φθοράς (σε mm) έγινε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο Mitutoyo TM. Χρησιμοποιήσαμε ενδεικτικά στο πείραμά μας τρία από τα 12 EDM δοκίμια που διαθέτουμε, ένα χαμηλής ενέργειας παλμού, ένα μέσης ενέργειας παλμού και ένα υψηλής ενέργειας παλμού (ήτοι μικρής, μεσαίας και υψηλής τιμής γινομένου  $I \times T$ ). Προς τούτο επελέγησαν τα δοκίμια  $I \times T$ :

- α) 30A – 100  $\mu\text{sec}$
- β) 30A – 300  $\mu\text{sec}$  και
- γ) 30A – 500  $\mu\text{sec}$

Ακολουθούν οι πίνακες F και F1 με τις πειραματικές μετρήσεις της φθοράς και τις καμπύλες φθοράς (mm) – χρόνου (min) που προκύπτουν.

Πίνακας F Μέτρηση φθορας [mm] σε EDM δοκίμια  
σε σχέση με το χρόνο τριβής

ΔΟΚΙΜΙΟ	time [min]			
	1	2	3	4
I=30 A T=100μsec	1	1,5	1,9	2,1
I=30 A T=300μsec	1,3	1,55	1,77	1,85
I=30 A T=500μsec	1,28	1,6	1,78	1,8





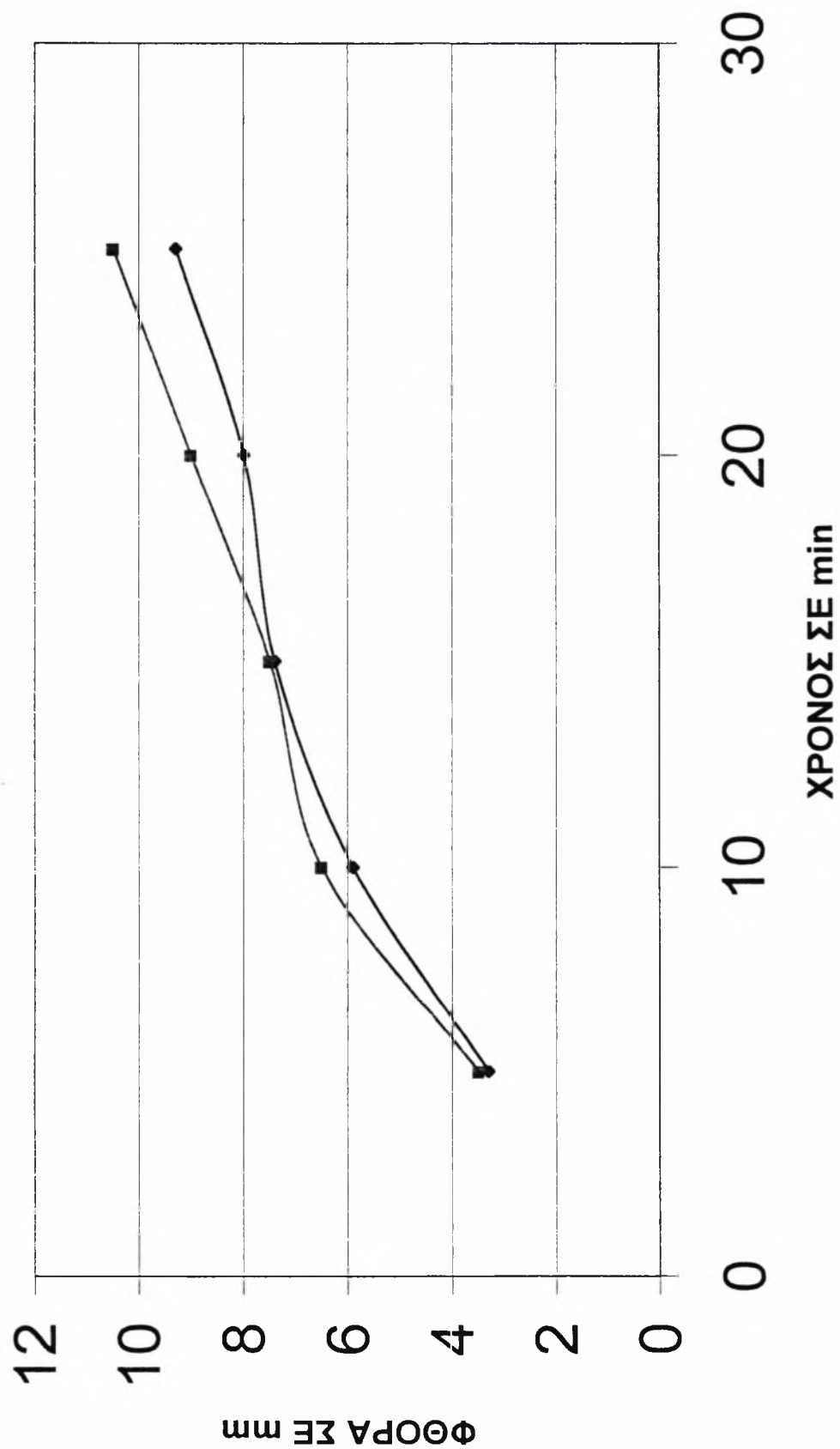
Μια πρώτη παρατήρηση που προκύπτει από τον πίνακα F1 είναι ότι το δοκίμιο με την μικρότερη ενέργεια παλμού (IxT) δηλαδή το δοκίμιο  $I = 30 \text{ A} / T = 100 \text{ } \mu\text{sec}$  παρουσιάζει τον υψηλότερο ρυθμό αύξησης της φθοράς. Μια ερμηνεία αυτού είναι το ότι «λευκό στρώμα» δεν έχει τόσο πάχος όσο στα δοκίμια με μεγαλύτερη ενέργεια παλμού και άρα η απώλεια φθοράς είναι υψηλότερη και γρηγορότερη. Έπειτα, σύμφωνα με τους νόμους του Holm ή του Archard θα περιμέναμε τα δοκίμια με υψηλότερη επιφανειακή σκληρότητα να δώσουν χαμηλότερες τιμές φθοράς, πράγμα που φαίνεται να επιβεβαιώνεται από έναν χρόνο και μετά (τα 2,5 min περίπου). Να θυμίσουμε ότι όσο αυξάνεται η ενέργεια παλμού, τόσο αυξάνεται και η επιφανειακή μικροσκληρότητα (σχ. II.2.23 σελ. 34).

Βέβαια το διάγραμμα F1 δεν είναι και τόσο κατατοπιστικό στο γιατί τέμνονται οι καμπύλες της φθοράς για διαφορετικές ενέργειες παλμού. Έτσι στην προσπάθειά μας να διερευνήσουμε την συμπεριφορά του «λευκού στρώματος» στην αντίσταση φθοράς προχωρήσαμε και σε νέες μετρήσεις. Αυτή την φορά επιλέξαμε δύο δοκίμια EDM υψηλής ενέργειας παλμού τα  $I = 20 \text{ A} / T = 500 \mu\text{sec}$  και  $I = 30 \text{ A} / T = 500 \mu\text{sec}$  ώστε να είμαστε σίγουροι για την ύπαρξη έντονου «λευκού στρώματος» και το υποβάλλουμε σε μακρείς χρόνους ολίσθησης, έως 25 min. Από τις μετρήσεις που πήραμε προέκυψαν οι πίνακες F2 και F3 (φθορά συναρτήσει του χρόνου) που ακολουθούν.

**Πίνακας F2 : Τιμές φθοράς [mm] σε EDM δοκίμια  
σε σχέση με το χρόνο τριβής (για μεγάλους χρόνους τριβής)**

<b>ΔΟΚΙΜΙΟ</b>	<b>Time [min]</b>				
	5	10	15	20	25
I=20 A T=500μsec	3.5	6.5	7.5	9	10.30
I=30 A T=500μsec	3.30	5.90	7.40	8	9.30

**ΠΙΝΑΚΑΣ F3 : ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΘΟΡΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ EDM ΔΟΚΙΜΙΩΝ**



Τώρα πλέον έχουμε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της φθοράς. Και οι δυο καμπύλες, μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι διακρίνονται σε 3 μέρη. Ένα πρώτο μέρος, μέχρι τα 10 min περίπου για το δοκίμιο 20/500 και μέχρι τα 15 min για το δοκίμιο 30/500, όπου έχουμε γρήγορη αύξηση της φθοράς (run – in stage). Ακολουθεί ένα δεύτερο τμήμα των καμπυλών, από 10 έως 15 min για το δοκίμιο 20/500 και από 15 έως 20 min για το δοκίμιο 30/500 όπου φαίνεται να έχουμε μια πιο μόνιμη κατάσταση. Εμφανίζεται τέλος το τρίτο τμήμα, μετά τα 15 min για το δοκίμιο 20/500 και μετά τα 20 min για το 30/500, όπου η φθορά πάλι αυξάνεται πιο γρήγορα.

Αυτό το τρίτο τμήμα είναι το τμήμα της καταστροφικής φθοράς, δηλαδή τμήμα που συμβαίνει η απολέπιση του «λευκού στρώματος» (delamination wear). Μάλιστα συμβαίνει νωρίτερα στο δοκίμιο 20/500 διότι σ' αυτό, λόγω χαμηλότερης ενέργειας παλμού, έχουμε λεπτότερο «λευκό στρώμα» το οποίο φθείρεται έτσι γρηγορότερα.

Να σημειώσουμε επίσης ότι το δοκίμιο 30/500 (με μεγαλύτερη ενέργεια παλμού άρα και υψηλότερη επιφανειακή σκληρότητα) δίνει χαμηλότερες τιμές φθοράς από το 20/500, επιβεβαιώνοντας έτσι τους νόμους του Holm και του Archard.

## V. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τις κυριότερες παρατηρήσεις αυτής της εργασίας πάνω στην τριβολογική συμπεριφορά ηλεκτροδιαβρωμένων χαλύβδινων (CK60) δοκιμίων, θα θέλαμε να σταθούμε στα επόμενα συμπεράσματα:

- 1) Οι ηλεκτροδιαβρωμένες (EDM) επιφάνειες χαρακτηρίζονται, όσον αφορά την επιφανειακή τοπογραφία, σαν «άδειες», «ανοικτές», «απτόμενες» και «τυχαίου σχήματος». Αυτά τα χαρακτηριστικά γίνονται πιο έντονα όταν εντείνονται οι συνθήκες κατεργασίας.
- 2) Η υφή των EDM επιφανειών χαρακτηρίζεται από κρατήρες αλληλοκαλυπτόμενους, επαναστερεοποιημένο υλικό, μικρορωγμές, μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς και παραμένουσες τάσεις. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι κυρίως θερμικής προέλευσης και δεν εμφανίζουν προτίμηση προς κάποια διεύθυνση, δηλαδή οι EDM επιφάνειες είναι ισότροπες.
- 3) Οι παράμετροι τραχύτητας και κυμάτωσης εμφανίζουν και αυτές ισοτροπία πάνω στις EDM επιφάνειες, οι δε τιμές τους εξαρτώνται (άλλες λίγο και άλλες παρά πολύ) από τις συνθήκες της ηλεκτροδιάβρωσης δηλαδή από το ρεύμα εκφόρτισης  $I$  και τον χρόνο εκφόρτισης  $T$  και βέβαια την ενέργεια εκφόρτισης (ή παλμού) που αντιστοιχεί στο γινόμενο  $I \times T$ . Η εξάρτηση αυτή και η αντίστοιχη συσχέτιση φαίνονται στα στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης που παρουσιάζουμε.
- 4) Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ηλεκτροδιάβρωσης είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR). Το MRR αυξάνεται με αύξηση του ρεύματος εκφορτίσεως (ή ρεύματος παλμού) καθώς και με την κυκλοφορία του διηλεκτρικού, επηρεάζει δε άμεσα την τραχύτητα επιφανείας  $R_a$ .
- 5) Η EDM κατεργασία δημιουργεί στις μεταλλικές επιφάνειες δυο ζώνες: το εξωτερικό «λευκό στρώμα» και την κάτωθι αυτού θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Το εξωτερικό «λευκό στρώμα» έχει υψηλότερη σκληρότητα από το βασικό μέταλλο και χαρακτηρίζεται κυρίως από την παρουσία μικρορωγμών, το δε πάχος του αυξάνεται με αύξηση του γινομένου  $I \times T$ .
- 6) Ο συντελεστής τριβής των EDM επιφανειών σε σχέση με τον χρόνο ολίσθησης παρουσιάζει μια γρήγορη αύξηση στην αρχή – πράγμα που πρέπει να αποδοθεί στην καταστροφή του «λευκού στρώματος» με απολέπιση – και κατόπιν τείνει



προς κάποια τιμή που χαρακτηρίζει τα τριβόμενα υλικά. Εξάλλου ο συντελεστής τριβής αυξάνεται με αύξηση των παραμέτρων τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_p$  και  $R_t$ .

- 7) Ο μηχανισμός φθοράς των EDM δοκιμών στα πειράματα ολίσθησης χαρακτηρίζεται από δύο φάσεις: η πρώτη, όπου απομακρύνεται το λευκό στρώμα με θρυμματισμό και απολέπιση (delamination wear) και η δεύτερη που ακολουθεί και είναι η μηχανική φθορά κοπής (διάβρωση) του βασικού μετάλλου.
- 8) Το λευκό στρώμα των EDM επιφανειών, επειδή έχει υψηλότερη σκληρότητα θεωρείται ότι είναι ένα τριβολογικό πλεονέκτημα και δίνει μικρότερη φθορά. Αυτό φαίνεται να επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα της παρούσας εργασίας. Όμως υπάρχει και η άλλη άποψη ότι το λευκό στρώμα μειώνει, λόγω της διάδοσης των μικρορωγμών στην επιφάνειά του, την αντοχή σε φθορά και άρα δίνει μεγαλύτερες φθορές όπου υπάρχει. Αυτό είναι ένα θέμα για περαιτέρω διερεύνηση.
- 9) Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) είναι πλέον μια κατεργασία με ευρεία εφαρμογή στην βιομηχανία γι' αυτό πρέπει η έρευνα να προχωρήσει και σε άλλα πεδία που την αφορούν, όπως:
  - EDM σε άλλα, ηλεκτραγώγιμα υλικά όπως π.χ. μεταλλικά κράματα, σύνθετα μέταλλα (composites) κλπ.
  - Να μελετηθεί η επίδραση και άλλων παραμέτρων κατεργασίας στην ποιότητα επιφανείας.

## VI. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Halling, University of Salford «Introduction to Tribology», WYKEHAM PUBLICATIONS, LONDON 1976
- [2] J. C. Rebelo, A. Morao Dias, D. Kremer, J. L. Lebrun "Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels", Journal of Material Processing Technology 84 (1998)
- [3] Biing Hwa Yan, Che Chung Wang "The machining characteristics of  $Al_2O_3/6061$  Al composite using rotary electro – discharge machining with a tube electrode". Journal of Material Processing Technology 95 (1999)
- [4] M. M. Koura, M. A. Omar "The effect of surface parameters on friction", Wear 73 (1981) Elsevier Sequoia S. A., Lausanne.
- [5] A. Ghosh, A. K. Mallik "Manufacturing science", EWP New Delhi, India, 1995.
- [6] Ε. Παπαδανιήλ, Μ. Σφαντζικόπουλος «Μηχανουργική Τεχνολογία – Εργαστήριο II» Τεύχος Β', Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 1994.
- [7] Ε. Παπαδανιήλ «Σημειώσεις επί της δι' ηλεκτροδιαβρώσεως κατεργασίας των μετάλλων», σημειώσεις στο μάθημα «ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΑΙ II» στο Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα 1977.
- [8] Vaxevanidis, N., G. Petropoulos, N. Hassiotis and P. Psylaki: "Surface Integrity Changes and Tribological Aspects in Electro – Discharge Machining" 3<sup>rd</sup> International Conference of Tribology BALKANTRIB' 99, Sinaia, Romania, Proc. Vol. I, pp. 147 – 154.
- [9] Vaxevanidis, N., P. Psylaki, G. Petropoulos and N. Hassiotis: "Surface Integrity and Microstructural Phenomena of Ck60 Steel due to Electro Discharge Machining", EUROMAT 99 Conference, September 1999, Munich, Germany, Proc. Vol. 7, pp. 240 – 247.

- [10] N. M. Vaxevanidis, G. P. Petropoulos, N. D. Hassiotis, C. N. Pantazaras "Multi – Parameter Analysis of Surface Textures and Tribological Functioning in Electro – Discharge Machining", 1<sup>st</sup> Mediterranean Tribology Conference, November 2000, Jerusalem, Israel pp. 52.
  
- [11] J. C. Rebelo, A. Morao Dias, Ruy Mesquita, Paulo Vassalo, Mário Santos "An experimental study on electro – discharge machining and polishing of high strength copper – beryllium alloys", Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) pp 389 – 397.
  
- [12] Σόλων Σ. Αντωνίου «Τριβολογία» Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών βιομηχανίας Παν. Θεσσαλίας, Πειραιάς 1994.
  
- [13] Dae – Eun Kim, Dong – Hwan Hwang "Experimental Investigation of the Influence of Machining Condition on the Contact Sliding Behavior of Metals", Journal of Manufacturing Science and Engineering, May 1998, Vol 120, pp 395 – 400
  
- [14] Y. Y. Yang, H. S. Fang and W. G. Huang "A study on wear resistance of the white layer", Tribology International Volume 29, Number 5, 1996, pp 425 – 428.



